

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

С. Л. КЛЯМКИН

ТЕПЛОВОЕ ИСПЫТАНИЕ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

WWW.JANKO.FRONT.RU



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА

1961

ЛЕНИНГРАД

В книге рассмотрены основные показатели экономичности и тепловые характеристики паротурбинных установок различных типов. Даны руководящие указания по организации и проведению теплового испытания этих установок на электростанциях, включая испытание центробежных электро- и турбонасосов.

Книга является практическим пособием для технического персонала служб наладки и испытаний при энергоуправлениях и на электростанциях, а также специализированных организаций и может быть полезной для студентов теплоэнергетической специальности, знакомых с основами теории и конструкции паротурбинных установок.

Клямкин Соломон Львович

Тепловое испытание паротурбинных установок электростанций
М.-Л., Госэнергиздат, 1961, 408 стр., с рис. 6П2.23

Редактор Л. И. Тубянский	Техн. редактор Е. М. Соболева
Сдано в производство 10/VII 1961 г.	Подписано к печати 15/XI 1961 г.
М-38006 Печ. л. прив. 20,9 + 2 вкл.	Уч.-изд. л. 21,4. Бум. л. 6,63.
Формат 84×108 ¹ / ₃₂ . Тираж 8000.	Заказ 655. Цена 1 р. 17 к.

Типография № 6 УПП ЛСНХ, Ленинград, ул. Мойсеенко, 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие советской энергетики требует от обслуживающего персонала дальнейшего повышения культуры эксплуатации как вновь вводимого, так и действующего оборудования электростанций, в том числе оборудования их турбинных цехов. Для этого необходима периодическая тщательная проверка технико-экономических показателей работы оборудования путем испытаний в целях выявления и устранения возможных недостатков в его эксплуатации, своевременного проведения ремонта, реконструкции или модернизации.

Не менее важной задачей является испытание головных образцов новых типов паротурбинных установок серийных выпусков для их оценки с точки зрения достижения проектного к. п. д. и сравнения с лучшими современными образцами аналогичных установок.

Отечественная литература, посвященная вопросам теплового испытания паротурбинных установок, насчитывает лишь несколько книг, среди которых наиболее значительными являются: «Испытание паровых турбин» А. В. Щегляева и Н. Г. Морозова, изданная в 1937 г., и «Испытание паровых турбогенераторов», ОРГРЭС (автор М. А. Ухоботин), изданная в 1952 г.

Поэтому назрела потребность в новом, более полном руководстве по тепловому испытанию паротурбинных установок на электростанциях. В нем должен быть изложен достаточно точный и доступный метод проведения испытания и построения тепловых характеристик установок всех типов, в том числе установки с двумя регулируемыми отборами пара, не рассмотренной в указанных книгах.

Кроме того, должны быть рассмотрены вопросы испытания центробежных насосов, составляющих основную часть расхода электроэнергии на собственные нужды установки, а также других сравнительно простых

испытаний, проводимых в машинных цехах тепловых электростанций.

Полные тепловые испытания, как правило, выполняют специализированные организации и при том лишь головных образцов установок для получения типовых характеристик. Поэтому особенно необходимы руководящие указания по проведению упрощенных тепловых испытаний, достаточных для осуществления правильной эксплуатации установок и доступных малочисленным группам наладки на электростанциях.

Указанные требования положены в основу настоящей книги. При ее составлении автор наряду с имеющейся литературой использовал опыт руководимой им лаборатории паровых турбин в Ленинградской энергосистеме.

Методы испытания установок с регулируемым отбором пара, определения поправки на вакуум в конденсаторе, проведения опытов при неизменном открытии органов парораспределения и др. изложены в соответствии с рекомендациями ОРГРЭС.

Рассматривая свою книгу как шаг на пути создания необходимого руководства, автор с благодарностью отмечает существенную помощь, оказанную ему ОРГРЭС, в особенности М. А. Ухоботиним.

Автор выражает благодарность инж. Л. И. Тубянскому за выполненный им большой труд по редактированию рукописи книги.

Все критические замечания просьба направлять по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Л. О. Госэнергоиздата.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые обозначения	7
Введение	9
Глава первая. Теоретические основы	13
1-1. Краткие сведения о работе пара в турбине	—
1-2. Коэффициенты полезного действия паротурбинной установки	19
1-3. Показатели экономичности и тепловые характеристики важнейших элементов паротурбинной установки	22
1-4. Общие показатели экономичности и тепловые характеристики паротурбинной установки	52
Глава вторая. Теплотехнические измерения	96
2-1. Общие сведения	—
2-2. Объем и точность измерений	100
2-3. Измерение давления среды	101
2-4. Измерение разности давлений двух сред	112
2-5. Измерение температуры среды	115
2-6. Особенности измерения давления и температуры при испытании паротурбинной установки	127
2-7. Измерение расхода пара и воды	129
2-8. Особенности измерения расходов при испытании паротурбинной установки	149
2-9. Определение удельного веса и теплосодержания воды и пара	158
2-10. Измерение уровня воды в сосуде	—
2-11. Измерение перемещений элементов регулирования и числа оборотов турбины	159
2-12. Измерение электрической мощности	160
Глава третья. Подготовка к испытанию	162
3-1. Общие положения	—
3-2. Ознакомление с установкой	—
3-3. Составление программы испытания	164
3-4. Подготовка установки к испытанию	173
3-5. Организационно-техническая часть подготовки испытания	175
Приложения к третьей главе	177
Глава четвертая. Экспериментальная часть испытания	213
4-1. Содержание экспериментальной части	—
4-2. Обязанности руководителя испытания	214

Глава пятая. Составление отчета об испытании	219
5-1. Точность результатов испытания	—
5-2. Обработка результатов измерений	231
5-3. Приведение опытных величин к условиям характеристики	247
5-4. Построение тепловых характеристик установки	267
5-5. Графоаналитический метод построения диаграмм режимов по расходу пара и тепла для установки с регулируемыми отборами пара (типов ВПТ-25 и ВТ-25)	268
5-6. Составление отчета об испытании	288
Приложения к пятой главе	293
Глава шестая. Испытание системы регулирования турбины	330
6-1. Общие положения	—
6-2. Снятие статической характеристики регулирования	332
6-3. Испытание со сбросом нагрузки	337
Приложения к шестой главе	340
Глава седьмая. Испытание центробежных насосов	345
7-1. Общие сведения	—
7-2. Программа испытания центробежного насоса	347
7-3. Особенности испытания конденсатного, сливного и циркуляционного насосов	350
7-4. Испытание турбонасоса	351
7-5. Обработка опытных данных	352
7-6. Отчет об испытании	—
Приложения к седьмой главе	357
Глава восьмая. Определение поправки на вакуум — на давление выхода	367
8-1. Общие положения	—
8-2. Условия проведения и режим опытов	369
8-3. Измерения	—
8-4. Обработка опытных данных	372
Глава девятая. Определение экономического вакуума	373
9-1. Общие положения	—
9-2. Условия проведения и режим опытов	374
9-3. Измерения	375
9-4. Обработка опытных данных	376
Глава десятая. Упрощенный метод теплового испытания паротурбинной установки	379
10-1. Общие положения	—
10-2. Примерная программа теплового испытания по упрощенному методу	382
10-3. Отчет об испытании	386
Приложения	397
Литература	407

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

А. Буквенные обозначения величин

p	— давление пара, воды [атм].
t	— температура пара, воды [°C].
T	— температура, °K ($T = t + 273$).
$t_{\text{нас}}$	— температура насыщения [°C].
i	— теплосодержание пара, воды [ккал/кг].
h_0	— располагаемое теплопадение [ккал/кг].
$h_{\text{и}}$	— использованное теплопадение [ккал/кг].
h_{02} и $h_{и2}$	— располагаемое и использованное теплопадения пара от его состояния перед паровпускными клапанами до выхода проточной части.
h	— высота столба ртути [м].
H	— уровень воды, геометрическая высота, высота столба ртути, воды [мм]; напор в метрах высоты столба перекачиваемой (насосом) жидкости.
D	— расход пара [кг/ч].
G	— расход воды [кг/ч].
Q	— расход тепла [ккал/ч]; объемный расход воды [м³/ч].
N	— внутренняя мощность [квт], или выработка электроэнергии [квт·ч/ч].
N_g	— мощность на зажимах генератора [квт].
n	— число оборотов [об/мин].
d	— удельный расход пара [кг/квт·ч].
q	— удельный расход тепла [ккал/квт·ч].
x	— степень сухости пара в долях единицы; перемещение муфты центробежного регулятора [мм].
$1-x$	— влажность пара в долях единицы.
y	— удельная теплофикационная выработка электроэнергии [квт·ч/ккал, квт·ч/Мккал].
z	— высота подъема штока сервомотора и регулирующих клапанов [мм].
S	— предельная относительная погрешность в долях единицы.
δ	— средняя квадратичная относительная погрешность, относительная величина в долях единицы; степень неравномерности регулирования [%].
Δ	— абсолютная небольшая величина потерь, погрешности, поправки соответствующего наименования.
α	— угловой коэффициент, множитель соответствующего наименования.
β	— множитель, поправочный множитель в долях единицы.
$\epsilon; k$	— постоянный множитель соответствующего наименования.
φ	— угол поворота кулачкового вала, сервомотора регулирования в градусах.
$\eta_{\text{аэ}}$	— абсолютный электрический к. п. д. установки в долях единицы или в процентах.
$\eta_{\text{оэ}}$	— относительный электрический к. п. д. установки в долях единицы или в процентах.
$\eta_{\text{во}}$	— внутренний относительный к. п. д. проточной части в долях единицы или в процентах.

$\eta_{эм}$ — электромеханический к. п. д. установки в долях единицы или в процентах.

η_r — к. п. д. генератора в долях единицы или в процентах.

Б. Индексы у буквенных обозначений

Индексы сверху у буквы

$Io, IIo, IIIo, Vo$ — порядковый номер отбора, к которому относится данная величина (например p^{Io} — давление пара первого отбора).

I, II, III, V — порядковый номер подогревателей по ходу конденсата (например p^I — давление пара перед подогревателем № 1).

$ч.в.д., ч.с.д., ч.н.д.$ — обозначения соответствующей проточной части высокого, среднего, низкого давления (например $N^{ч.в.д.}$ — внутренняя мощность части высокого давления).

«Т» — общее обозначение потока пара, тепла регулируемого отбора.

«к» — обозначение конденсатора для потоков пара и воды.

Буквы без индексов сверху относятся к установке в целом (например N_3).

Индексы внизу у буквы

«к» или «пит» — конденсат или питательная вода (буквы без этих индексов относятся к пару).

1 или 2 — обозначение величины на входе или на выходе потока из данного элемента установки (например $t_{к2}^I$ — температура конденсата на выходе из подогревателя № 1).

«п» или «т» — обозначение промышленного или теплофикационного отбора пара (например p_p или p_t).

x — величина при условиях характеристики установки (например p_{1x} — давление свежего пара при условиях характеристики).

«оп» — величина в условиях опыта.

«макс» или «мин» — максимальное или минимальное значение данной величины.

«пред» — одно из многих предельных (наибольших) значений величины, зависящей от данных условий.

Другие обозначения, а также отступления от указанных выше поясняются в тексте.

В. Сокращения

ТЭС — тепловая электростанция.

ТГ — турбогенератор (вместо паротурбинной установки).

ЭЛ — энерголаборатория или организация, производящая испытание установки.

Дренаж — конденсат греющего пара в поверхностных подогревателях.

ВВЕДЕНИЕ

Правила технической эксплуатации электростанций и сетей [Л. 19, § 354] требуют проведения теплового испытания паротурбинной установки в следующих случаях:

1) после монтажа, в пределах гарантийного срока — при отсутствии типовой характеристики [Л. 25, стр. 641];
2) после длительной эксплуатации — более 50 000 час работы;

3) после существенных изменений конструкции, состояния или условий работы установки.

Целью испытания является получение тепловых, т. е. технико-экономических, характеристик установки при исправном ее состоянии и заданных условиях работы.

Результаты теплового испытания служат:

1) для проверки заводских гарантий;
2) для обеспечения правильной эксплуатации и, в случае необходимости, усовершенствования установки;

3) для оперативного контроля, анализа, нормирования и планирования технико-экономических показателей работы установки.

При тепловом испытании, в отличие от обычной эксплуатации, осуществляют:

1) различные устойчивые режимы нагрузки при определенных условиях работы установки во время опытов;

2) увеличенный объем и повышенную точность измерений;

3) тщательную обработку и оценку полученных данных. Испытание состоит из трех этапов:

1) подготовки к испытанию;
2) экспериментальной части;
3) составления отчета об испытании.

В соответствии с задачами и целями испытания в книге излагаются:

1) краткие сведения о работе пара в турбине и о показателях экономичности и тепловых характеристиках установки, необходимые для понимания закономерностей характеристик и для их анализа;

2) методы правильного выполнения теплотехнических измерений;

3) практические вопросы указанных трех этапов испытания применительно к разным типам установок.

Глава шестая, седьмая, восьмая и девятая с приложениями служат для расширения содержания книги. В них рассматриваются методы проведения ряда сравнительно несложных испытаний, диктуемых практикой эксплуатации паротурбинной установки:

1) испытание системы регулирования (скорости);

2) испытание центробежных насосов;

3) определение поправки на вакуум — на давление выхлопа;

4) определение экономического вакуума.

Глава десятая посвящена упрощенному методу теплового испытания паротурбинной установки.

Испытание насосов оказывается необходимой частью теплового испытания установки для оценки ее экономичности по отпуску электроэнергии, а также для выбора наиболее экономичного режима ее работы.

За исключением ограниченной по объему главы об испытании регулирования, обычно совмещаемого с тепловым испытанием установки, в книге не затрагиваются вопросы, не имеющие отношения к экономичности установки.

Наиболее сложной частью книги является глава, посвященная расчету и построению диаграммы режимов для установки с двумя регулируемыми отборами пара. При известной краткости изложения эта глава все же представляет особый интерес, поскольку рассматриваемые в ней вопросы мало освещены в литературе, в то время как установки данного типа находят все более широкое распространение.

По характеру изложения автор стремился к необходимой для практического руководства сосредоточенности, полноте и инструктивной сжатости указаний по важнейшим этапам испытания, учитывая последовательность их выполнения.

Образцы форм, таблиц и графиков приведены в книге в качестве примера и составлены в основном применительно к наиболее сложному типу установки с двумя регулируемыми отборами пара (ВПТ-25). Но благодаря единой методике они пригодны и для других типов установок, особенности которых в большинстве случаев могут быть учтены путем исключения ненужных пунктов.

Применение готовых форм с определенной системой обозначений облегчает организацию испытания и обработку его результатов, позволяет сократить физический объем отчета, а вместе с тем наглядно и достаточно полно представить результаты испытания.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1-1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ ПАРА В ТУРБИНЕ

Экономичность паротурбинной установки в целом определяется величиной η [квт·ч/ккал] выработки электрической энергии (или мощности), приходящейся на 1 ккал тепла, отпускаемого тепловым потребителям (при отсутствии конденсатора) или расходуемого на установку (при наличии конденсатора).

Характерным показателем экономичности турбин с конденсатором является обратная величина — удельный расход тепла на выработку 1 квт·ч электроэнергии: q [ккал/квт·ч].

В процессе работы водяного пара в турбине известная часть его тепловой энергии переходит в механическую (по первому закону термодинамики), а затем в электрическую энергию, равную

$$N = 427h_u [\text{кГ} \cdot \text{м/кг}],$$

или

$$N = \frac{h_u}{860} [\text{квт} \cdot \text{ч/кг}], \quad (1-1)$$

где N — механическая или электрическая энергия, полученная от 1 кг пара;

$h_u = i_1 - i_2$ — использованное теплопадение, равное разности теплосодержаний (энтальпий) свежего и отработавшего пара, ккал/кг (рис. 1-1).

Следовательно, количество электрической энергии, получаемой от 1 кг пара, определяется лишь величиной использованного теплопадения, которая зависит от параметров пара и характера теплового процесса турбины (исключая электромеханические потери — см. ниже).

В турбине пар расширяется. Его давление p , температура t и теплосодержание (энтальпия) i уменьшаются, а удельный объем v и энтропия s увеличиваются.

Тепловой процесс наглядно изображается на $i-s$ диаграмме водяного пара.

Любая точка на $i-s$ диаграмме определяет состояние пара. Зная два параметра, например p_1 и t_1 , остальные находят в точке пересечения соответствующих изопараметрических линий $p_1 = \text{const}$ и $t_1 = \text{const}$ или же по таблицам водяного пара [Л. 24].

Практически доступны измерению лишь величины p и t .

Для влажного пара параметры p и t связаны однозначно (т. е. линии $p = \text{const}$ и $t = \text{const}$ на $i-s$ диаграмме совпадают), и поэтому их недостаточно для определения его состояния. Для определения состояния влажного пара необходимо, кроме параметров p и t , знание еще одной величины, например сухости x или теплосодержания i , непосредственное измерение которых затруднительно или невозможно.

Теплопадение h_0 в идеальном процессе перехода тепловой энергии пара в механическую называется располагаемым, изоэнтропным или адиабатным.

На $i-s$ диаграмме величина h_0 изображается вертикальным отрезком от точки начального состояния пара p_1, t_1 до точки его пересечения с изобарой конечного давления p_2 (рис. 1-2):

$$h_0 = i_1 - i_{2ad}$$

Располагаемое теплопадение h_0 является мерой механической энергии или работоспособности 1 кг пара. Оно увеличивается с повышением начальных параметров пара p_1 и t_1 , а также с понижением конечного

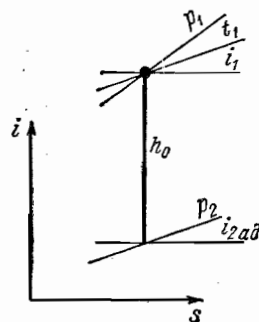


Рис. 1-2. Располагаемое теплопадение пара h_0 на $i-s$ диаграмме.

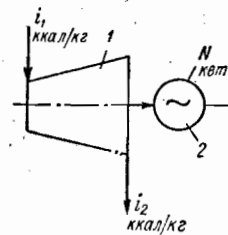


Рис. 1-1. Схема получения электрической энергии от 1 кг пара.

1 — турбина; 2 — генератор.

давления p_2 и зависит только от этих величин — см. h_{01} , h_{02} , h_{03} и h'_{01} на рис. 1-3.

Увеличение теплопадения h_0 при повышении начального давления p_1 происходит лишь до известного предела, зависящего от начальной температуры пара t_1 , а затем оно уменьшается — см. рис. 1-4 [Л. 30, стр. 21].

В случае влажного пара в конце процесса (рис. 1-3) его влажность $(1-x)$ уменьшается, а сухость x возрастает:

с понижением начального давления p_1 (см. x_1 и x_2);

с повышением конечного давления p_2 (см. x_1 и x'_1);

с повышением начальной температуры пара t_1 (см. x_3 и x_2).

Дросселирование свежего пара, т. е. снижение его давления при неизменном теплосодержании $i_1 = \text{const}$, ведет к уменьшению теплопадения и к уве-

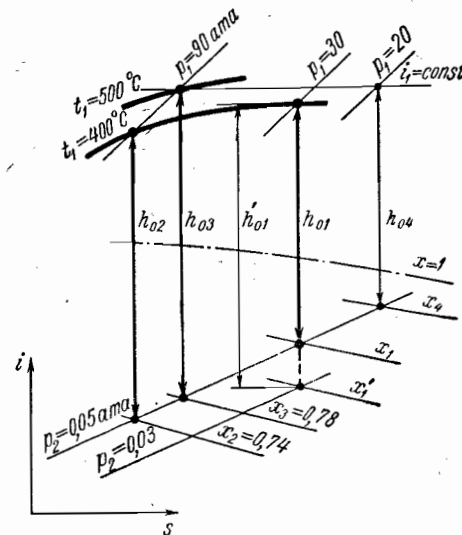


Рис. 1-3. Зависимость располагаемого теплопадения и конечной сухости пара от параметров p_1 , t_1 и p_2 .

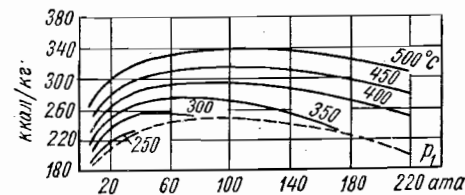


Рис. 1-4. Влияние начального давления на располагаемое теплопадение при $p_2 = 0,04 \text{ atm}$.

личению конечной сухости пара — см. h_{04} и h_{03} , x_4 и x_3 на рис. 1-3. Изменения величин h_0 и x при смещениях теплового процесса на $i-s$ диаграмме объясняются

характером изолиний $p = \text{const}$, $t = \text{const}$ и $x = \text{const}$ и их различным наклоном.

Адиабатное теплопадение может быть определено также по формуле

$$h_0 = A \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (1-2)$$

где $A = \frac{1}{427} \text{ ккал/кг} \cdot \text{м}$;

k — показатель адиабаты для перегретого пара,
 $k \approx 1,31$;

p_1 и p_2 — начальное и конечное давления пара, кг/м^2 ;
 v_1 — начальный удельный объем пара, $\text{м}^3/\text{кг}$.

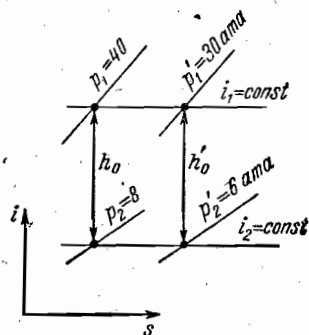


Рис. 1-5. Равенство располагаемых теплопадений при равных отношениях p_2/p_1 .

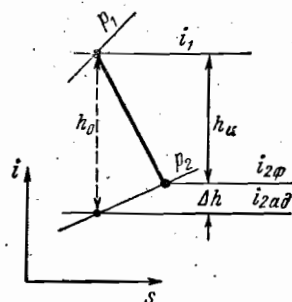


Рис. 1-6. Располагаемое и использованное теплопадение на $i-s$ диаграмме.

[Из формулы (1-2) видно следующее:

1) $h_0 = \text{const}$, если $\frac{p_2}{p_1} = \text{const}$ и $pv = \text{const}$ (или $i_1 = \text{const}$) — см. рис. 1-5;

2) $h_0 \rightarrow 0$, если $\frac{p_2}{p_1} \rightarrow 1$;

3) h_0 увеличивается с увеличением $p_1 v_1$ (или i_1).

Для водяного пара $k \neq \text{const}$, поэтому формула (1-2) имеет приближенный характер.

Вследствие потерь трения, завихрений и утечек пара в турбине фактическое использованное теплопадение меньше располагаемого: $h_u < h_0$ (рис. 1-6), а фактическое теплосодержание отработавшего пара больше, чем при идеальном процессе: $i_{2ф} > i_{2ад}$.

Величина $\Delta h_0 = h_0 - h_u$ является потерей располагаемой энергии 1 кг пара относительно идеального процесса, зависящей от самой турбины.

Кроме того, при понижении конечного давления использованное теплопадение возрастает лишь до момента достижения предельной расширительной способности косо срез лопаток последней ступени; при этом возрастают потери с выходной скоростью.

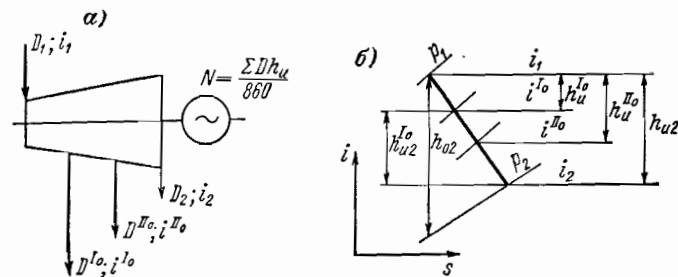


Рис. 1-7. Мощность турбины с отборами пара: а — схема потоков пара; б — линия процесса на $i-s$ диаграмме.

Дальнейшее понижение конечного давления сопрягается бесполезным расширением пара за пределами аточного аппарата [Л. 23].

Мощность турбины или выработка электроэнергии (в $\text{квт} \cdot \text{ч/ч}$) определяется по формуле

$$N = \frac{D h_u}{860},$$

где $\frac{h_u}{860}$ — электроэнергия, вырабатываемая 1 кг пара, $\text{квт} \cdot \text{ч/кг}$;

D — расход пара на турбину, кг/ч .

Мощность турбины с отборами пара равна сумме мощностей отдельных потоков пара. Например, для схемы рис. 1-7

$$N = \frac{D^{10} h_u^{10} + D^{110} h_u^{110} + D_2 h_{u2}}{860}.$$

Для любой турбины имеем:

$$N = \frac{\Sigma D h_u}{860}. \quad (1-3)$$

Из рис. 1-7, б видно, что

$$h_n^{I_0} < h_n^{II_0} < h_{n2};$$

следовательно,

$$h_{n\text{ ср}} < h_{n2},$$

где

$$h_{n\text{ ср}} = \frac{\sum Dh_n}{\sum D} = \frac{\sum Dh_n}{D_1};$$

$$D_1 = D^{I_0} + D^{II_0} + D_2 = \sum D.$$

Таким образом, среднее использованное теплопадение 1 кг свежего пара у турбины с отборами зависит от их относительной величины и теплопадений; оно меньше, чем у турбины без отборов, при одинаковых начальных параметрах и конечном давлении.

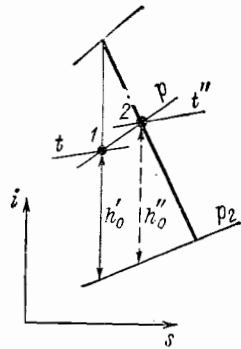


Рис. 1-8. Возврат тепла в ступенях — $h_0' > h_0''$.

Энергетическая ценность (теплоценность) отборного пара определяется отношением его теплопадения до выхлопа к теплопадению свежего пара до выхлопа, или коэффициентом ценности ξ .

Например, на рис. 1-7 для пара первого отбора

$$\xi = \frac{h_{n2}^{I_0}}{h_{n2}} = \frac{h_{n2} - h_n^{I_0}}{h_{n2}}.$$

На рис. 1-8 изображен тепловой процесс в двух последовательных ступенях. Вследствие потерь в первой ступени начало процесса во второй перемещается на $i-s$ диаграмме из точки 1 в точку 2, где $h_0'' > h_0'$, поскольку

$$t'' > t' \text{ при } \frac{p_2}{p_1} = \text{const.}$$

Величина $a = \frac{h_0'' - h_0'}{h_0'}$ называется коэффициентом возврата тепла.

Для всей турбины коэффициент возврата тепла $a = 1 \div 1,08$; он возрастает с увеличением числа ступеней и с уменьшением их к. п. д., т. е. с увеличением смещения процесса вправо на $i-s$ диаграмме.

* Точнее см. § на стр. 73.

В заключение следует заметить, что по $i-s$ диаграмме увеличению на 1% конечной влажности пара при давлении около 0,05 *атм* соответствует уменьшение конечного теплосодержания или увеличение использованного теплопадения h_{n2} на ~ 6 ккал/кг, что для турбин с параметрами пара 90 *атм*, 500° С составляет около 2,5% теплопадения h_{n2} . Из этого видно, что при определении использованного теплопадения такой турбины из уравнения баланса мощности ($860N = \sum Dh_n$ — см. § 5-2) с погрешностью 1% получаемая конечная влажность пара имеет погрешность около 0,4%. В конденсационной турбине при конечном давлении около 0,05 *атм* понижение начального давления (дресселирование) на 10% при неизменном теплосодержании, равно как и понижение начальной температуры на 10° С при неизменном давлении, приводит к уменьшению располагаемого теплопадения на ~ 3 ккал/кг.

1-2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Для оценки экономичности паротурбинной установки применяются перечисленные ниже коэффициенты полезного действия.

1. Термический к. п. д. цикла

$$\eta_T = \frac{h_0}{i_1 - i_{\text{пит}}} = \frac{h_0}{h_0 + (i_{2\text{ад}} - i_{\text{пит}})}, \quad (1-4)$$

где h_0 — среднее для 1 кг свежего пара располагаемое теплопадение от его состояния перед стопорным клапаном до выхода из турбины, ккал/кг;

$i_1 - i_{\text{пит}}$ — тепло 1 кг свежего пара, израсходованное в установке, ккал/кг;

i_1 — теплосодержание свежего пара, ккал/кг;

$i_{\text{пит}}$ — среднее теплосодержание возвращаемого от установки конденсата свежего пара, ккал/кг (рис. 1-9);

$i_{2\text{ад}} - i_{\text{пит}}$ — потери идеального цикла на конденсацию пара.

Конденсатор и регенеративные подогреватели позволяют повысить термический к. п. д. η_T цикла за счет увеличения соответственно теплопадения h_0 и температуры возвращаемого конденсата $i_{\text{пит}}$, т. е. увеличения механической работы и уменьшения расхода тепла 1 кг пара.

2. Коэффициент дросселирования (к. п. д. регулирования или парораспределения)

$$\eta_{др} = \frac{h'_0}{h_0} = 1 - \frac{h_0 - h'_0}{h_0}, \quad (1-5)$$

где h'_0 — среднее располагаемое теплопадение 1 кг свежего пара от его состояния при входе из всех клапанов в проточную часть турбины до выхода из нее, ккал/кг;

$h_0 - h'_0$ — потери дросселирования в органах парораспределения против идеального процесса, ккал/кг.

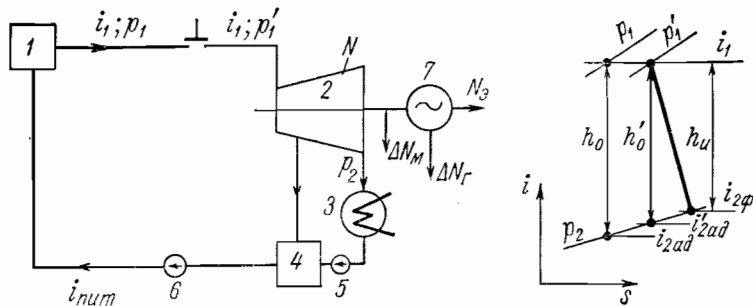


Рис. 1-9. Принципиальная тепловая схема и $i-s$ диаграмма процесса паротурбинной установки.

1 — котел; 2 — турбина; 3 — конденсатор; 4 — регенеративная система; 5 и 6 — конденсатный и питательный насосы; 7 — генератор.

3. Внутренний относительный к. п. д. турбины

$$\eta_{во} = \frac{h_{и}}{h'_0} = 1 - \frac{h'_0 - h_{и}}{h'_0}, \quad (1-6)$$

где $h_{и}$ — среднее для 1 кг свежего пара использованное теплопадение, ккал/кг;

$h'_0 - h_{и}$ — внутренние потери в проточной части турбины (ккал/кг) против идеального, адиабатного процесса.

Отношение использованного теплопадения к располагаемому для сквозного потока пара от его состояния перед стопорным клапаном до выхлопа называют д и а

граммным внутренним относительным к. п. д. (рис. 1-9):

$$\eta_{во2} = \frac{h_{и2}}{h_{о2}}.$$

4. Электромеханический к. п. д. установки

$$\eta_{эм} = \eta_{г} \eta_{м} = \frac{N - \Delta N_{эм}}{N} = \frac{N_{э}}{N}, \quad (1-7)$$

где $\eta_{м}$ — механический к. п. д. турбины:

$$\eta_{м} = \frac{N - \Delta N_{м}}{N};$$

$\eta_{г}$ — к. п. д. генератора:

$$\eta_{г} = \frac{N - \Delta N_{м} - \Delta N_{г}}{N - \Delta N_{м}};$$

$\Delta N_{м}$ — потери в передаче механической энергии — от рабочих лопаток до муфты на валу турбины (трение в подшипниках, расход на привод от вала турбины маслоснасосов; к ним же относят потери тепла на излучение), кВт;

$\Delta N_{г}$ — потери перехода механической энергии в электрическую — от муфты на валу до зажимов генератора (в меди, в активной стали, в подшипниках, вентиляционные, на возбуждатель), кВт;

$\Delta N_{эм}$ — электромеханические потери турбины и генератора:

$$\Delta N_{эм} = \Delta N_{м} + \Delta N_{г};$$

N — внутренняя мощность, получаемая на рабочих лопатках турбины, кВт — по формуле (1-3);

$N_{э}$ — мощность на зажимах генератора, кВт:

$$N_{э} = N - \Delta N_{эм}.$$

5. Абсолютный электрический к. п. д. установки

$$\eta_{аэ} = \eta_{г} \eta_{др} \eta_{во} \eta_{эм} = \frac{h_{и}}{i_1 - i_{пит}} \eta_{эм}. \quad (1-8)$$

Величина $\eta_{аэ}$ представляет собой отношение полученной электрической энергии к затраченной тепловой, выраженных в одинаковых тепловых единицах (ккал), и характе-

ризует экономичность всей установки в целом.

6. Относительный электрический к. п. д. установки

$$\eta_{\text{оэ}} = \eta_{\text{во}} \eta_{\text{эм}}.$$

Применяются и другие коэффициенты полезного действия [Л. 31, стр. 172].

Из потерь «холодного конца» теплового цикла перечисленные к. п. д. учитывают лишь потери с выходной скоростью пара за последней ступенью и паровое сопротивление выхлопного патрубка турбины (считая конечное давление по его значению на входе в конденсатор). Остальные потери, связанные с превышением давления на входе в конденсатор над давлением насыщения при температуре холодного источника (начальной температуре охлаждающей воды), зависят от температурного напора и нагрева воды в конденсаторе, следовательно, характеризуют экономичность системы охлаждения и могут учитываться отдельно.

1-3. ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАЖНЕЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Важнейшими элементами установки в отношении экономичности (к. п. д.) являются:

- 1) парораспределение;
- 2) проточная часть;
- 3) регенеративные подогреватели и конденсатор;
- 4) тепловая схема.

Совершенство каждого элемента установки оценивают по его тепловым характеристикам, т. е. основным показателям экономичности в зависимости от нагрузки или от других соответствующих величин.

Наряду с рассмотрением указанных характеристик отметим возможные в работе элементов установки недостатки, выявление которых входит в задачу испытания.

1. Парораспределение

К органам парораспределения относятся автоматический стопорный клапан и регулирующие, дроссельные, перегрузочные клапаны, а также поворотные диафрагмы как разновидность регулирующих клапанов.

Основным показателем совершенства перечисленных органов в отношении экономичности является потеря давления в них:

1) при полном открытии клапана $\Delta'p$;

2) в момент открытия очередного клапана $\Delta''p$.

При сопловом парораспределении (регулируванні) эти потери давления составляют:

$$\Delta'p = 0,02 \div 0,05 p_1;$$

$$\Delta''p \approx 0,1 p_1.$$

При дроссельном регулировании нормальной потерей давления в дроссельном клапане в момент открытия перегрузочного обводного клапана можно считать

$$\Delta''p_{\text{др}} \approx 0,03 p_1,$$

где p_1 — давление перед клапаном.

Для автоматического стопорного клапана

$$\Delta'p \approx 0,01 p.$$

Имеет значение также очередность открытия клапанов, которая должна отвечать проектным данным.

Общим показателем экономичности парораспределения при данной нагрузке служит средний коэффициент дросселирования [см. выражение (1-5)]:

$$\eta_{\text{др}} = \frac{\sum D h'_0}{\sum D h_0}.$$

Для турбины с дроссельным парораспределением без отборов пара

$$\eta_{\text{др}} = \frac{h'_{02}}{h_{02}},$$

где h_{02} и h'_{02} — располагаемое теплопадение пара от состояния перед и за дроссельным клапаном до выхлопа.

При сопловом парораспределении, где средний коэффициент дросселирования зависит от расходов пара через отдельные клапаны, его определение затруднительно.

В работе парораспределения возможны следующие недостатки, влияющие на экономичность установки:

1) несвоевременное, неполное открытие клапанов вследствие неправильной установки элементов регулирования, преждевременного ограничения хода в системе регулирования и парораспределения;

2) пропуск пара через неплотно закрытый клапан (при этом давление за клапаном повышено — выше, чем в камере регулирующей ступени при сопловом парораспределении);

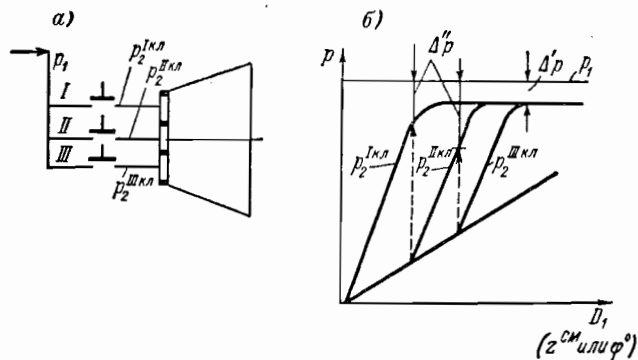


Рис. 1-10. Характеристика $p_2^{к.л} = f(D_1)$ парораспределения.

3) недостаточное проходное сечение клапана, подводящего паропровода и защитной сетки (засорение сетки), вихревые потери при полном открытии клапана;

4) заедание, обрыв штока клапана.

Перечисленные недостатки обнаруживают путем измерений, осмотра, сравнения с проектными данными.

Основными характеристиками парораспределения являются:

а) давление пара за клапанами в зависимости от расхода свежего пара или от хода сервомотора (рис. 1-10)

$$p_2^{к.л} = f(D_1),$$

или

$$p_2^{к.л} = f(z^{см}; \varphi);$$

б) расход свежего пара в зависимости от хода или от угла поворота сервомотора (рис. 1-11)

$$D_1 = f(z^{см}; \varphi);$$

в) подъем клапанов в зависимости от хода или от угла поворота сервомотора (рис. 1-12)

$$z^{к.л} = f(z^{см}; \varphi)$$

(или от давления масла при гидродинамическом регулировании).

Форма и расположение характеристик определяются проектными данными системы парораспределения и регулирования (условиями обеспечения устойчивости, плавности, экономичности работы, конструктивными требованиями).

По условиям устойчивости нагрузки график зависимости $D_1 = f(z^{см}; \varphi)$ должен быть плавным, близким к прямой линии, что иногда сопровождается повышенным значением величины $\Delta''p$, т. е. перекрышей клапанов.

При сопловом парораспределении угол наклона характеристики $p_2^{к.л} = f(D_1)$ тем меньше, чем больше проход-

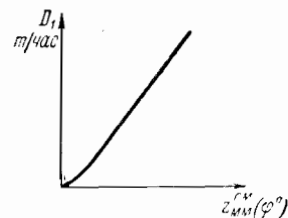


Рис. 1-11. Характеристика $D_1 = f(z^{см}; \varphi)$ парораспределения.

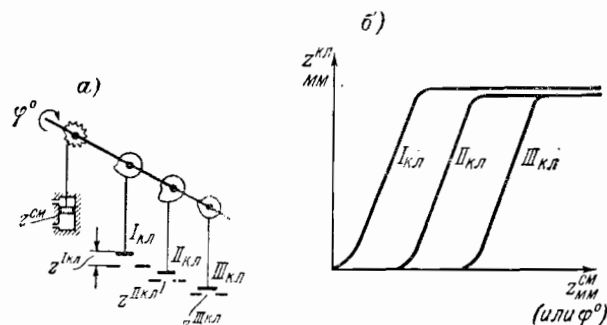


Рис. 1-12. Схема перемещения регулирующих клапанов (а) и характеристика $z^{к.л} = f(z^{см}; \varphi)$ парораспределения (б).

ное сечение или число сопел за ним, ниже давление в регулирующей ступени (когда его отношение к давлению за клапаном больше критического) и больше его перекрыша — при одновременном открытии других клапанов.

При максимальной нагрузке и давлении свежего пара примерно на 5% ниже номинального в турбине с сопловым парораспределением потеря давления в последнем регулирующем клапане должна иметь нормальное значение. В противном случае можно закрыть часть сопел за этим клапаном, после чего давление за клапаном при том же расходе пара повысится.

В заключение следует заметить, что величина $\Delta'p$ отражается на широкой зоне нагрузки при полном открытии данного клапана, в то время как величина $\Delta''p$ снижает экономичность установки лишь в ограниченной зоне перекрыши клапанов.

2. Проточная часть

Проточная часть турбины включает в себя омываемые потоками пара элементы: сопловые аппараты, рабочие и направляющие лопатки, диафрагмы, диски, уплотнения вала в диафрагмах и на выходе из цилиндра, входные и выходные патрубки, перепускные трубы.

Основным показателем экономичности или совершенства проточной части (турбины, группы ступеней, отдельной ступени) является ее внутренний относительный к. п. д. $\eta_{\text{во}}$, величина которого характеризует степень использования работоспособности 1 кг пара в проточной части.

Значение величины $\eta_{\text{во}}$ данной проточной части турбины или любого ее отсека может быть легко определено при помощи $i-s$ диаграммы, если известны параметры пара (p_1, t_1 и p_2, t_2) на входе и на выходе и весь процесс протекает в области перегретого пара.

Вследствие трудностей определения среднего состояния пара после регулирующих клапанов при сопловом регулировании внутренний относительный к. п. д. первого отсека (группы ступеней до камеры первого отбора, в которой измеряются параметры пара), как и всей турбины, часто оценивают, включая потери дросселирования в клапанах:

$$\eta_{\text{во}} = \eta'_{\text{во}} \eta_{\text{др}} = \frac{h_{\text{н}}}{h_0},$$

где теплопадение h_0 определяется в зависимости от состояния пара перед стопорным клапаном (рис. 1-13).

Ориентировочные расчетные значения внутреннего относительного к. п. д. равны:

для регулирующих ступеней:	
при одной ступени скорости	75—80%
» двух ступенях скорости	65—70%
для ступеней в области влажного пара . . .	70—80%
» промежуточных ступеней	80—90%

Причинами пониженного к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ проточной части, т. е. увеличенных потерь на трение, завихрение и перетекание пара, могут быть:

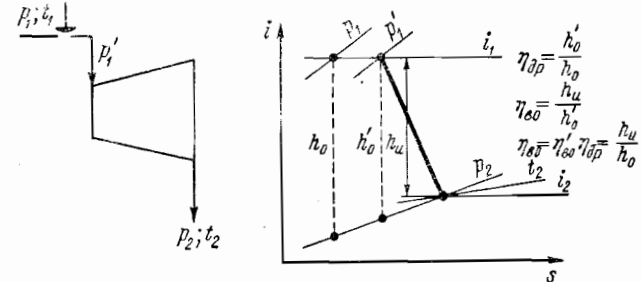


Рис. 1-13. Определение внутреннего относительного к. п. д. проточной части ($\eta'_{\text{во}}$) и турбины ($\eta_{\text{во}}$) на $i-s$ диаграмме.

1) конструктивные недостатки, несовершенный профиль лопаток;

2) нерасчетные (увеличенные) зазоры в сопловых коробках, между рабочими лопатками и неподвижными элементами, в концевых и внутренних уплотнениях вала, в частности в уплотнениях поворотных диафрагм (турбин ЛМЗ);

3) солевые отложения, эрозия, механические повреждения лопаток; отсутствие части лопаток;

4) повышенная потеря давления в перепускных трубах между цилиндрами ($> 0,03 p_{\text{пт}}$) и в выхлопных патрубках ($> 0,05 p_{\text{вп}}$) — см. [Л. 30, стр. 164]. Следует заметить, что в современных крупных турбинах в результате использования диффузорного эффекта в выхлопных патрубках давление на выходе (статическое) оказывается несколько выше, чем на входе;

5) нерасчетный режим работы.

Недостатки, перечисленные в пп. 1—4, обнаруживают путем измерений, осмотра, сравнения с проектными и лучшими современными данными.

Основными характеристиками проточной части являются:

а) давление пара в камерах отборов и регулирующих ступенях в зависимости от расхода пара через последующую ступень или от расхода пара на входе в проточную часть

$$p_1 = f(D_1);$$

б) внутренний относительный к. п. д. в зависимости от расхода пара через проточную часть (или от хода сервомотора)

$$\eta_{\text{вн}} = f(D_1), \text{ или } \eta_{\text{вн}} = f(z_{\text{см}}; \varphi);$$

в) $i-s$ диаграмма теплового процесса для характерных режимов нагрузки.

а) Характеристика $p_1 = f(D_1)$ проточной части

Характеристика $p_1 = f(D_1)$ определяет пропускную способность проточной части и служит для контроля в процессе эксплуатации степени загрязнения лопаточного аппарата солевыми отложениями.

Для данной группы ступеней без промежуточных отборов пара и при скоростях его меньше критической (что обычно имеет место) зависимость расхода пара D_1 от его параметров p_1 и T_1 на входе и давления p_2 на выходе выражается известной формулой [Л. 30, стр. 249]:

$$\frac{D_1}{D_0} = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2}} \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}},$$

где все величины, обозначенные индексом «0», являются заведомо известными, неизменными, установленными путем расчета или надежного эксперимента.

Отсюда

$$\frac{\sqrt{p_1^2 - p_2^2}}{\sqrt{T_1}} = \frac{\sqrt{p_{10}^2 - p_{20}^2}}{D_0 \sqrt{T_{10}}} D_1 = k D_1,$$

где

$$k = \frac{\sqrt{p_{10}^2 - p_{20}^2}}{D_0 \sqrt{T_{10}}} = \text{const},$$

а

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + k^2 D_1^2 T_1}. \quad (1-9)$$

Для малых значений $\frac{p_2}{p_1} \leq 0,1$ (см. стр. 252), а также при критической скорости в одной из ступеней

$$p_1 = k D_1 \sqrt{T_1}, \quad (1-10)$$

а при $\frac{p_2}{p_1} \leq 0,1$ и $T_1 = \text{const}$

$$p_1 = k_2 D_1, \quad (1-11)$$

где $k_2 = k \sqrt{T_1} = \text{const}$ при неизменной проходной площади ступеней.

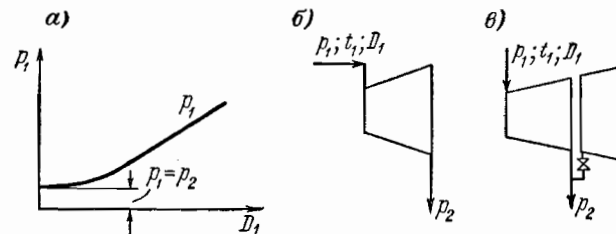


Рис. 1-14. Давление в любой ступени (а) турбины с противодавлением (б) и перед регулируемым отбором (в) при $\frac{p_2}{p_1} > 0,1$.

Так как для пара $p_1 \approx \frac{RT_1}{v_1}$, то из формулы (1-11) следует:

$$\frac{D_1 v_1}{RT_1} = \text{const} \text{ и } D_1 v_1 = \text{const},$$

где $D_1 v_1$ — объемный расход пара на входе в проточную часть, $\text{м}^3/\text{с}$.

Характеристика $p_1 = f(D_1)$ для различных групп ступеней выражается формулами (1-9), (1-10) или (1-11) в зависимости от величины p_2/p_1 и постоянства T_1 :

а) для ступеней турбины с противодавлением или для группы ступеней до регулируемого отбора ($p_2/p_1 > 0,1$), без перегрузки в последующие ступени (рис. 1-14, а—в)

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + k^2 D_1^2 T_1},$$

где p_1 , T_1 и D_1 — давление, температура и расход пара на входе в проточную часть;

б) для турбины с конденсатором без отборов пара ($\frac{p_2}{p_1} < 0,1$): в камерах регулирующей ступени и перегрузочной (в зоне перегрузки), где $T \neq \text{const}$ (рис. 1-15),

$$p_1 = kD_1 \sqrt{T_1};$$

в любой ступени, кроме последней (вне зоны очень малых расходов пара) и за дроссельным клапаном (до начала перегрузки), где $T \approx \text{const}$ (рис. 1-16),

$$p_1 = k_2 D_1.$$

При наличии нерегулируемых отборов пара

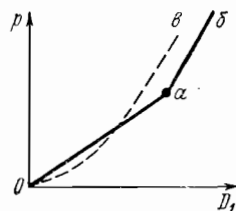


Рис. 1-15. Давление в камере перегрузки (Oab) и в камере регулирующей ступени (Oa) конденсационной турбины при $\frac{p_2}{p_1} < 0,1$.

α — момент открытия перегрузочного клапана.

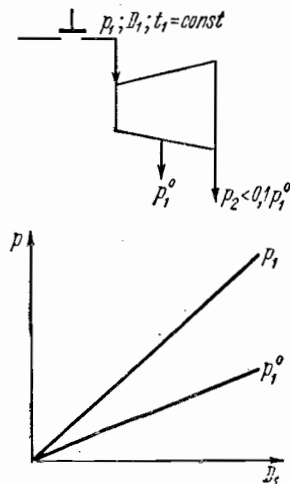


Рис. 1-16. Давление в промежуточной ступени при относительно малом давлении в конце данной группы ступеней.

выражения в пп. «а» и «б» справедливы, лишь когда расходы пара через все ступени пропорциональны расходу свежего пара D_1 , что практически не наблюдается, но отклонения от пропорциональности невелики.

б) Характеристика $\eta_{\text{во}} = f(D_1)$ проточной части

Внутренний относительный к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ ступени уменьшается при отклонении фактического отношения u/c_1 от расчетного оптимального значения [Л. 30, стр. 260].

Здесь u — окружная скорость рабочих лопаток ступени, м/сек;

c_1 — абсолютная скорость пара при входе на рабочие лопатки, м/сек.

Поскольку $u = \text{const}$, а $c_1 = f(h_u)$, то

$$\eta_{\text{во}} = f(h_u), \text{ или } \eta_{\text{во}} = f(h_0);$$

но при $i_1 = \text{const}$ [см. формулу (1-2)]

$$h_0 = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right);$$

следовательно,

$$\eta_{\text{во}} = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right),$$

т. е. к. п. д. ступени зависит от отношения давления пара после ступени к его давлению перед ней.

Изменение отношения p_2/p_1 в ступенях (при $i_1 = \text{const}$) служит главной причиной изменения к. п. д. проточной части при отклонении расхода пара от расчетного значения, что видно из следующего рассмотрения.

1. В турбине с конденсатором и без отборов пара для любой ступени кроме регулирующей и последней: $p_1 = k_2 D_1$; $p_1' = k_2' D_1$, следовательно, отношение давлений

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_1'}{p_1} = \frac{k_2'}{k_2} = \text{const},$$

и к. п. д. ступени $\eta_{\text{во}} = \text{const}$ (рис. 1-17).

2. Для последней ступени перед регулируемым отбором или выхлопом, где давление $p_2 = \text{const}$, с уменьшением расхода пара против расчетного давление перед ступенью p_1 уменьшается и отношение $\frac{p_2}{p_1} \rightarrow 1$, т. е. отклоняется от расчетного значения, и к. п. д. ступени падает (рис. 1-18). В зоне малых расходов пара это наблюдается в ряде последних ступеней и потому к. п. д. турбины особенно низок — см. рис. 1-17 и 1-18.

3. К. п. д. регулирующей ступени с уменьшением расхода пара падает волнообразно соответственно закрытию регулирующих клапанов: по мере закрытия каждого клапана давление за ним ($p_2^{\text{кл}}$) приближается к давлению

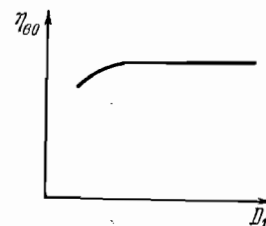


Рис. 1-17. График внутреннего относительного к. п. д. группы ступеней (без регулирующей и последних ступеней) конденсационной турбины.

в регулирующей ступени (p^{pc}), вследствие чего отношение давлений $p^{pc}/p_2^{кл}$ стремится к единице, а располагаемое теплопадение h_0 для потока пара через этот клапан приближается к нулю (рис. 1-19, а и б).

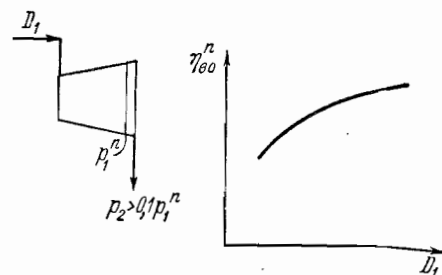


Рис. 1-18. График внутреннего относительного к. п. д. ступеней перед камерой регулируемого отбора и перед выхлопом.

При сопловом парораспределении и значительном теплопадении в регулирующей ступени ее к. п. д. заметно отражается на к. п. д. всей турбины, особенно в турбине с противодавлением ($\frac{p_2}{p_1} > 0,1$) или с относительно большим промышленным отбором.

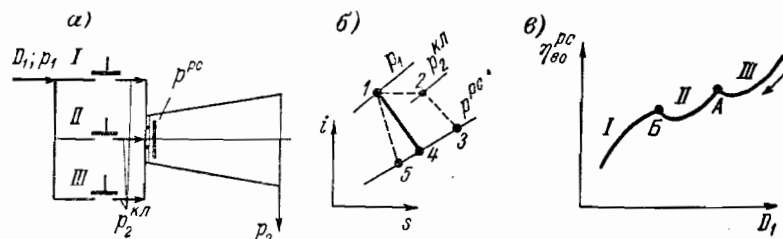


Рис. 1-19. График внутреннего относительного к. п. д. регулирующей ступени: а — схема потоков пара; б — схема процесса на $i-s$ диаграмме; в — к. п. д. ступени; А — момент полного закрытия III клапана; Б — момент полного закрытия II клапана.

1-2-3 — линия процесса для потока пара через частично открытый клапан; 1-5 — линия процесса для потока пара через полностью открытый клапан; 4 — среднее состояние пара в регулирующей ступени.

При весьма малой нагрузке давление в регулирующей ступени приближается к давлению выхлопа $p^{pc} \rightarrow p_2$, почти все теплопадение в турбине приходится на одну регулируемую ступень (одну группу сопел с дросселированием в первом клапане) и к. п. д. турбины резко понижен.

4. К. п. д. группы обводимых ступеней (при обводном регулировании) с увеличением расхода пара в зоне перегрузки падает вследствие повышения давления в перегрузочной камере $p_{пер}$ при неизменном давлении за дроссельным клапаном, т. е. из-за увеличения отношения $p_{пер}/p_{др}$ против расчетного (рис. 1-20).

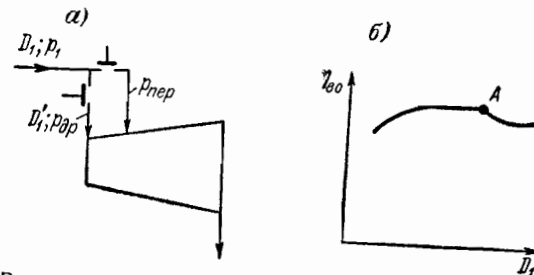


Рис. 1-20. График внутреннего относительного к. п. д. ступеней, обводимых при перегрузке: а — схема потоков пара; б — к. п. д. ступеней; А — момент открытия перегрузочного клапана.

Одновременно сокращается расход пара через обводную группу ступеней (см. стр. 28):

$$D_1' = D_1 \frac{\sqrt{(p_1^2 - p_{пер}^2)'}}{\sqrt{p_1^2 - p_{пер}^2}}.$$

Следует заметить, что к. п. д. последних ступеней турбины с конденсатором, работающих в зоне влажного пара, увеличивается примерно на 1% на каждый 1% уменьшения средней влажности пара в этих ступенях, что имеет место при расходах свежего пара меньше расчетного.

При расчетной нагрузке и прочих одинаковых условиях внутренний относительный к. п. д. турбины с сопловым парораспределением ниже, чем с дроссельным (включая потери дросселирования в паровпускных органах), вследствие более низкого к. п. д. регулирующей ступени (см. стр. 27). С уменьшением нагрузки потери в дроссельном клапане возрастают, с некоторого момента становясь больше потерь в регулирующей ступени, которые также возрастают, вследствие увеличения располагаемого теплопадения h_0^{pc} и уменьшения к. п. д. $\eta_{го}^{pc}$ ступени.

Полагая к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ всех ступеней турбины после регулирующей и после дроссельного клапана одинаковым, получаем для обеих систем парораспределения следующие потери использованного теплопадения по сравнению с его значением при к. п. д. всей турбины, равном $\eta_{\text{во}}$:

в регулирующей ступени

$$\Delta h_{\text{н}}^{\text{pc}} = h_0^{\text{pc}} (\eta_{\text{во}} - \eta_{\text{во}}^{\text{pc}});$$

в дроссельном клапане

$$\Delta h_{\text{н}}^{\text{др}} = \Delta h_0^{\text{др}} \eta_{\text{во}}.$$

Следовательно, сопловое парораспределение будет экономически равноценным с дроссельным, т. е. внутренние относительные к. п. д. всей турбины будут равны, если

$$\Delta h_{\text{н}}^{\text{pc}} = \Delta h_{\text{н}}^{\text{др}}, \text{ или } h_0^{\text{pc}} (\eta_{\text{во}} - \eta_{\text{во}}^{\text{pc}}) = \Delta h_0^{\text{др}} \eta_{\text{во}};$$

отсюда

$$\eta_{\text{во}}^{\text{pc}} = \eta_{\text{во}} \left(1 - \frac{\Delta h_0^{\text{др}}}{h_0^{\text{pc}}} \right), \quad (1-12)$$

где $\Delta h_0^{\text{др}}$ и h_0^{pc} выражены в ккал/кг или в процентах от полного теплопадения турбины h_{02} . (Коэффициент возврата тепла не учитываем).

В табл. 1-1 приведены подсчитанные по формуле (1-12) значения $\eta_{\text{во}}^{\text{pc}}$, при которых потери для соплового и дроссельного парораспределения одинаковы; к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ всех ступеней, кроме регулирующей, принят равным 85%.

Таблица 1-1

$\Delta h_0^{\text{др}} : h_0^{\text{pc}}$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0
$\eta_{\text{во}}^{\text{pc}}$	0	17	34	51	68	85

Пусть, например, для турбины типа ВК-50 ($p_1 = 90 \text{ атa}$; $t_1 = 500^\circ \text{C}$; $p_2 = 0,05 \text{ атa}$) при нагрузке, равной 0,3 номинальной, известны $\Delta h_0^{\text{др}} = 38 \text{ ккал/кг}$ и $h_0^{\text{pc}} = 120 \text{ ккал/кг}$; тогда $\Delta h_0^{\text{др}} : h_0^{\text{pc}} = 0,32$, и по табл. 1-1 находим $\eta_{\text{во}} = 58\%$.

Таким образом, при указанных условиях сопловое парораспределение экономичнее дроссельного, если $\eta_{\text{во}}^{\text{pc}}$ больше 58%.

Возвращаясь к характеристике $\eta_{\text{во}} = f(D_1)$, заметим, что изменение параметров пара перед проточной частью искажает зависимость ее к. п. д. от расхода пара, поскольку данному значению D_1 отвечает разное открытие клапанов. Более постоянной является зависимость к. п. д. проточной части (турбины или отдельно ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. турбины с регулируемыми отборами пара) от хода сервомотора парораспределения этой проточной части:

$$\eta_{\text{во}} = f(z^{\text{см}}; \varphi).$$

в) $i-s$ диаграмма теплового процесса

$i-s$ диаграмма теплового процесса отражает весь ход изменения параметров пара в отсеках турбины, т. е. между камерами отборов, где измеряется давление и температура пара.

Участок диаграммы в области влажного пара строят приближенно (см. стр. 238).

Характер $i-s$ диаграммы зависит от системы парораспределения и степени его открытия или режима паровой нагрузки турбины, как это показано ниже.

Тепловой процесс при дроссельном обводном парораспределении без отборов пара

Рассмотрим три режима паровой нагрузки (рис. 1-21):
первый (I) режим — $D' = D_p$ — расчетный расход пара при закрытом перегрузочном клапане;

второй (II) режим — $D'' < D_p$ — расход пара меньше расчетного;

третий (III) режим — $D''' > D_p$ — режим перегрузки.

Считаем, что при всех режимах давление выхлопа относительно мало: $\frac{p_2}{p_1} < 0,1$.

I режим: $D' = D_p$

1. На $i-s$ диаграмме теплового процесса теплосодержание пара за дроссельным клапаном то же, что и для свежего пара:

$$i'_{\text{др}} = i_1.$$

2. Давление за дроссельным клапаном ниже давления свежего пара:

$$p'_{\text{др}} < p_1.$$

3. К. п. д. $\eta_{\text{воп}}$ последнего отсека ниже к. п. д. других отсеков — линия процесса положе, т. е. больше отклоняется вправо, из-за влажности, а также из-за потерь с выходной скоростью пара.

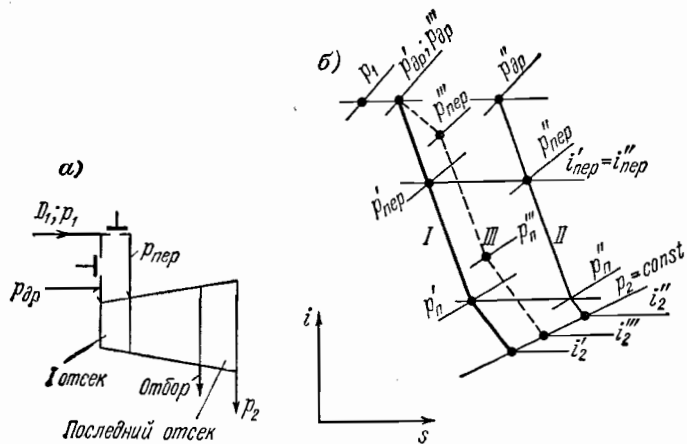


Рис. 1-21. $i-s$ диаграмма теплового процесса турбины с дроссельным обводным парораспределением без регулируемых отборов пара: a — схема потоков пара; b — $i-s$ диаграмма.

I режим: $D' = D_p$; II режим: $D'' < D_p$; III режим: $D''' > D_p$.

II режим: $D'' < D'$

1. Давление пара за дроссельным клапаном

$$p_{\text{др}}'' = p_{\text{др}}' \frac{D''}{D'},$$

t. e.

$$p''_{\text{др}} < p'_{\text{др}}.$$

Теплосодержание пара за дроссельным клапаном

$$i''_{\text{др}} = i'_{\text{др}}.$$

2. Давление пара в перегрузочной камере

$$p''_{\text{пер}} = p'_{\text{пер}} \frac{D''}{D'},$$

т. е.

$$p''_{\text{пер}} < p'_{\text{пер}}.$$

Располагаемое теплопадение пара в первом отсеке — до перегрузочной камеры

$$h''_{0I} = h'_{0I},$$

ПОСКОЛЬКУ

$$\frac{\rho''_{\text{пер}}}{\rho''_{\text{др}}} = \frac{\rho'_{\text{пер}}}{\rho'_{\text{др}}}.$$

К. п. д. первого отсека

$$\eta''_{\text{BO I}} = \eta'_{\text{BO I}},$$

что следует из предыдущего.

Теплосодержание пара в перегрузочной камере

$$i''_{\text{пер}} = i'_{\text{пер}}.$$

Такие же соотношения получаются для других отсеков проточной части, кроме последнего.

3. Давление пара перед последним отсеком

$$p''_{\Pi} = p'_{\Pi} \frac{D''}{D'},$$

т. е. $p''_{\Pi} < p'_{\Pi}$ при неизменном давлении за последним отсеком $p_2 = \text{const}$.

Располагаемое теплопадение в последнем отсеке

$$h''_{\text{оп}} < h'_{\text{оп}} ,$$

поскольку

$$\frac{p_2}{p_{\Pi}} > \frac{p_2}{p_{\Pi}}.$$

К. п. д. последнего отсека

$$\eta_{\text{вон}}'' < \eta_{\text{вон}}'$$

вследствие отклонения располагаемого теплопадения от расчетного значения.

Использованное теплопадение последнего отсека

$$h''_{\text{нп}} < h'_{\text{нп}},$$

что следует из предыдущего.

4. Внутренний относительный к. п. д. всей проточной части турбины

$$\eta''_{\text{во}} < \eta'_{\text{во}}$$

из-за уменьшения располагаемого теплопадения и к. п. д. последнего отсека.

III режим: $D''' > D'$

1. Давление пара за дроссельным клапаном

$$p''_{\text{др}} \approx p'_{\text{др}}$$

так как клапан полностью открыт.

Теплосодержание за дроссельным клапаном

$$i''_{\text{др}} = i'_{\text{др}}$$

2. Давление пара в перегрузочной камере

$$p''_{\text{пер}} = p'_{\text{пер}} \frac{D'''}{D'} \sqrt{\frac{T'_{\text{пер}}}{T''_{\text{пер}}}},$$

так как

$$T''_{\text{пер}} > T'_{\text{пер}}; p''_{\text{пер}} > p'_{\text{пер}}$$

Располагаемое теплопадение пара в первом отсеке

$$h''_{01} < h'_{01}$$

вследствие дросселирования обводного потока свежего пара до давления в перегрузочной камере, а также увеличения отношения $p_{\text{пер}}/p_{\text{др}}$ для потока пара через обводимые ступени и уменьшения их к. п. д.

К. п. д. первого отсека

$$\eta''_{\text{во I}} < \eta'_{\text{во I}}$$

Использованное теплопадение первого отсека

$$h''_{\text{и I}} < h'_{\text{и I}}$$

Теплосодержание пара в перегрузочной камере

$$i''_{\text{пер}} > i'_{\text{пер}}$$

3. В других отсеках проточной части, кроме последнего,

$$p'' = p' \frac{D'''}{D'} \sqrt{\frac{T'}{T''}}$$

По ходу пара влияние изменения температуры пара в перегрузочной камере падает.

Полагая, что давление пара в каждом отсеке пропорционально расходу пара, можно считать:

$$h''_0 \approx h'_0; \eta''_{\text{во}} \approx \eta'_{\text{во}}; h''_{\text{и}} \approx h'_{\text{и}}; i'' > i';$$

последнее вытекает из повышенного теплосодержания пара в камере перегрузочной ступени.

4. В последнем отсеке давление

$$p''_{\text{п}} \approx p'_{\text{п}} \frac{D'''}{D'},$$

т. е.

$$p''_{\text{п}} > p'_{\text{п}}$$

при неизменном давлении после отсека $p_2 = \text{const.}$

Располагаемое теплопадение

$$h''_{\text{оп}} > h'_{\text{оп}},$$

поскольку

$$\frac{p_2}{p_{\text{п}}} < \frac{p_2}{p'_{\text{п}}}$$

К. п. д.

$$\eta''_{\text{воп}} < \eta'_{\text{воп}}$$

вследствие отклонения располагаемого теплопадения от расчетного значения.

Использованное теплопадение

$$h''_{\text{ип}} > h'_{\text{ип}}$$

за счет большего $h''_{\text{оп}}$.

5. Внутренний относительный к. п. д. всей турбины

$$\eta''_{\text{во}} < \eta'_{\text{во}}$$

вследствие дросселирования потока пара в перегрузочную камеру, пониженного к. п. д. обводимой группы ступеней и последнего отсека проточной части.

Уменьшение внутреннего относительного к. п. д. турбины при перегрузке тем заметнее, чем больше расход пара в перегрузочную камеру и его дросселирование, т. е. чем меньше отношение располагаемых теплопадений от перегрузочной камеры и от состояния свежего пара до выхлопа.

*Тепловой процесс при сопловом парораспределении
без отборов пара*

Рассмотрим два характерных режима паровой нагрузки (рис. 1-22):

первый (I) режим — $D' = D_p$ — расчетный расход пара;

второй (II) режим — $D'' < D_p$ — расход пара меньше расчетного.

I режим: $D' = D_p$

1. Начало процесса на i — s диаграмме для всех режимов нагрузки показано от состояния пара после стопорного

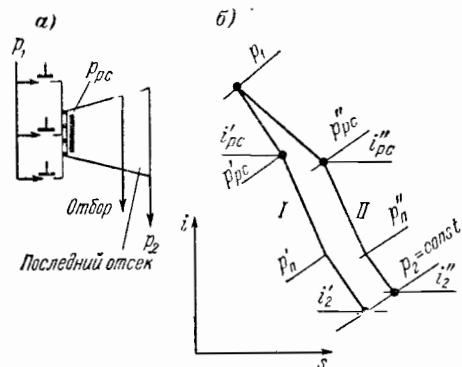


Рис. 1-22. i — s диаграмма теплового процесса турбины при сопловом парораспределении без регулируемых отборов пара: а—схема потоков пара; б— i — s диаграмма.

I режим: $D' = D_p$; II режим: $D'' < D_p$.

клапана. Дросселирование в регулирующих клапанах включено в потери регулирующей ступени.

2. Линия процесса в регулирующей ступени положе, чем в других ступенях, из-за более низкого ее к. п. д.

3. Линия процесса в последнем отсеке, как и при дроссельном парораспределении, также положе.

II режим: $D'' < D'$

1. Давление в камере регулирующей ступени

$$p_{pc}'' = p_{pc}' \frac{D''}{D'} \sqrt{\frac{T_{pc}'}{T_{pc}''}},$$

т. е.

$$p_{pc}'' < p_{pc}'.$$

Располагаемое теплопадение в регулирующей ступени

$$h_{0pc}'' > h_{0pc}',$$

поскольку

$$\frac{p_{pc}''}{p_1} < \frac{p_{pc}'}{p_1}.$$

К. п. д. регулирующей ступени

$$\eta_{ворс}'' < \eta_{ворс}'$$

вследствие отклонения располагаемого теплопадения от расчетного значения, а также дросселирования пара в неполностью открытых клапанах.

Использованное теплопадение регулирующей ступени

$$h_{ирс}'' > h_{ирс}'$$

вследствие увеличенного располагаемого теплопадения, но в то же время оно зависит от $\eta_{ворс}$.

Теплосодержание пара в камере регулирующей ступени

$$i_{pc}'' < i_{pc}',$$

как следствие увеличения $h_{ирс}$.

2. В других отсеках проточной части, кроме последнего, как и при дроссельном парораспределении, к. п. д. и использованное теплопадение можно считать неизменными, исключая влияние пониженного теплосодержания пара в камере регулирующей ступени.

В последнем отсеке, как и при дроссельном парораспределении,

$$h_{0п}'' < h_{0п}'; \quad \eta_{воп}'' < \eta_{воп}'; \quad h_{ип}'' < h_{ип}.$$

3. Внутренний относительный к. п. д. всей проточной части турбины

$$\eta_{во}'' < \eta_{во}'$$

вследствие увеличения доли располагаемого теплопадения менее экономичной регулирующей ступени, понижения ее к. п. д. (включая дросселирование пара в клапанах) и понижения к. п. д. последнего отсека.

Таким образом, с уменьшением расхода пара против расчетного значения в любой проточной части турбины происходит:

уменьшение располагаемого теплопадения h_0 из-за дросселирования всего или части потока пара при неполном открытии клапанов;

увеличение теплопадения h_0 и уменьшение к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ регулирующей ступени — при сопловом парораспределении;

уменьшение теплопадения h_0 и к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ последних ступеней (ч. в. д., ч. с. д., всей турбины) при неизменном давлении на выходе;

незначительное изменение теплопадения h_0 и к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ промежуточных ступеней;

уменьшение общего внутреннего относительного к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ проточной части турбины.

Тепловой процесс в турбине с регулируемым отбором пара

Каждая часть турбины — ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д. — работает самостоятельно в зависимости от ее системы парораспределения и нагрузки при $p_1 = \text{const}$ и $p_2 = \text{const}$: см. рис. 1-23 для соплового парораспределения и рис. 1-24 для дроссельного парораспределения в ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. На обоих рисунках процесс в отдельных ступенях не показан.

При выключенных регуляторах давления в отборах тепловой процесс всей турбины такой же, как для турбины без отборов (рис. 1-21 и 1-22). Необходимые пояснения даны на рис. 1-23 и 1-24:

От давления в камере регулируемого отбора зависит максимальный расход пара через последующую проточную часть (ч. с. д., ч. н. д.) при полностью открытом ее парораспределении. Повышение давления в камере ведет к уменьшению теплопадения h_0 в предыдущей проточной части (ч. в. д., ч. с. д.) за счет ее последних ступеней и к повышению теплосодержания в камере; в последующей проточной части (ч. с. д., ч. н. д.) теплопадение h_0 увеличивается в основном также за счет ее последних ступеней — см. $h'_{0\text{II}}$ и $h''_{0\text{II}}$ на рис. 1-25.

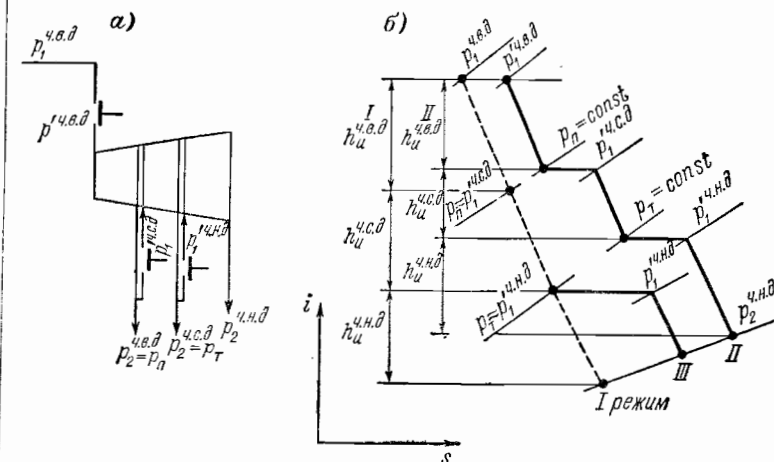


Рис. 1-23. $i-s$ диаграмма теплового процесса турбины с регулируемым отбором пара при дроссельном парораспределении: а — схема потоков пара; б — $i-s$ диаграмма.

$$p_2^{\text{ч.в.д.}} = p_{\text{II}} = p_1^{\text{ч.с.д.}}; p_2^{\text{ч.с.д.}} = p_{\text{I}} = p_1^{\text{ч.н.д.}};$$

$$p_1' = f(D_1) \text{ — для ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.}$$

Режим	Открытие клапанов парораспределения		
	ч. в. д.	ч. с. д.	ч. н. д.
I	Полное	Полное	Полное
II	Неполное	Неполное	Неполное
III	Полное	Полное	»

Потеря давления в полностью открытых клапанах принята равной нулю.

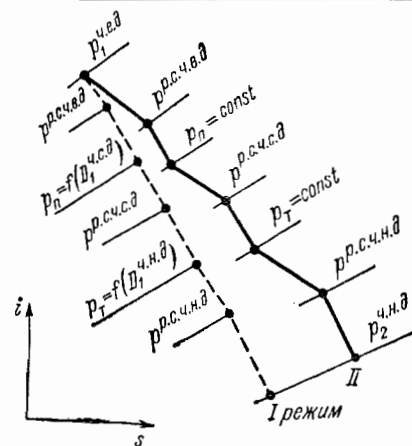


Рис. 1-24. $i-s$ диаграмма теплового процесса турбины с регулируемым отбором пара при сопловом парораспределении.

$p^{р.с.} = f(D_1)$ — для ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.

Режим	Открытие клапанов парораспределения		
	ч. в. д.	ч. с. д.	ч. н. д.
I	Полное	Полное	Полное
II	Неполное	Неполное	Неполное

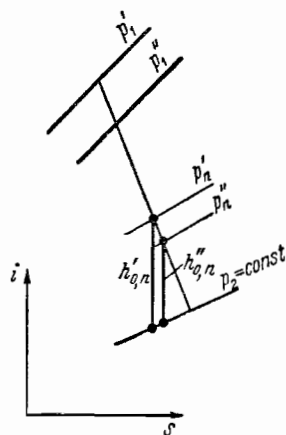


Рис. 1-25. Изменение располагаемого теплопадения последней ступени отсека (ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.) при увеличении расхода пара через отсек.

$$D'_1 > D''_1; p'_1 > p''_1; \\ p'_n > p''_n; h'_{оп} > h''_{оп}.$$

3. Регенеративные подогреватели и конденсатор

Регенеративные подогреватели и конденсатор в паротурбинных установках являются паро-водяными теплообменниками поверхностного типа (исключая деаэраторы).

Основным показателем совершенства работы теплообменника с точки зрения экономичности установки является величина температурного напора

$$\delta t = t_{нас} - t_{в2} [^{\circ}\text{C}],$$

где $t_{нас}$ — температура насыщения греющего пара по его давлению при входе в теплообменник;

$t_{в2}$ — температура воды на выходе из теплообменника (температуру перегрева пара в расчет не принимают).

Наличие температурного напора, или недогрева воды до температуры насыщения греющего пара, приводит к повышению его давления на выходе из турбины (давления выхлопа) или к увеличению расхода отборного пара более высокого давления — в регенеративной системе.

Повышение температурного напора означает ухудшение работы теплообменника и понижение экономичности установки — ее термического к. п. д., вследствие уменьшения выработки электроэнергии (средних значений располагаемого и использованного теплопадения) и снижения температуры питательной воды — за последним подогревателем. В подогревателе смешивающего типа (деаэраторе) температурный напор близок к нулю.

Потеря давления в паропроводе, присущая всем видам теплообменников, равнозначна соответствующему повышению температурного напора и является показателем экономичности тепловой схемы.

Теплообменник рассчитывается по следующим формулам:

формула теплопередачи через поверхность теплообмена

$$Q = Fk\Delta t_{ср};$$

формула теплообмена (теплового баланса)

$$Q = G\Delta i_{в}.$$

В этих формулах обозначено:

Q — тепло, передаваемое в теплообменнике (от пара к воде), ккал/ч;

F — поверхность теплообмена, m^2 ;
 k — коэффициент теплопередачи: тепло, передаваемое через $1 m^2$ поверхности теплообмена в час при разности температур теплоносителей (пара и воды) $1^\circ C$, $ккал/m^2 \cdot ч \cdot град$;

G — расход воды через теплообменник, $кг/ч$;

Δi_v — нагрев воды: разность теплосодержаний (энтальпий) воды¹ на выходе из теплообменника и на входе в него:

$$\Delta i_v = i_{v2} - i_{v1} \text{ [ккал/кг]};$$

Δt_{cp} — средняя разность температур пара и воды:

$$\Delta t_{cp} = t_{нас} - \frac{t_{v2} + t_{v1}}{2} = \delta t + \frac{\Delta t_v}{2};$$

Δt_v — разность температур воды на выходе из теплообменника и на входе в него:

$$\Delta t_v = t_{v2} - t_{v1}.$$

Точнее и несколько меньше, чем Δt_{cp} , логарифмическая разность температур:

$$\Delta t'_{cp} = \frac{\Delta t_v}{2,3 \lg \frac{\delta t + \Delta t_v}{\delta t}}.$$

Разность $\Delta t_{cp} - \Delta t'_{cp}$ тем больше, чем больше нагрев воды Δt_v и меньше температурный напор δt , что видно из данных, приведенных в табл. 1-2.

Таблица 1-2

$\Delta t_v, ^\circ C$	5			15			30		
$\delta t, ^\circ C$	5	10	15	5	10	15	5	10	15
$\Delta t_{cp} - \Delta t'_{cp}, ^\circ C$	0,3	0,2	0,2	1,7	1,1	0,8	4,7	3,9	2,7

Величинами, зависящими от теплообменника, являются только поверхность теплообмена F и коэффициент теплопередачи k .

Температура перегрева пара мало влияет на нагрев воды, что видно из следующего примера: тепло, отдаваемое

¹ Теплосодержание воды по абсолютной величине отличается от ее температуры — см. приложение IV.

1 кг насыщенного пара, равно 550 ккал/кг, а тепло, отдаваемое 1 кг пара за счет перегрева в $100^\circ C$, — около 50 ккал/кг. Таким образом, нагрев воды за счет перегрева по отношению к нагреву насыщенным паром составляет около 9% $\left(\frac{50 \cdot 100}{550} \right)$.

Кроме того, коэффициент теплопередачи от перегретого пара значительно ниже, чем от насыщенного. Однако благодаря частичному использованию перегрева пара в современных подогревателях температурный напор в них $\delta t \leq 0$.

Ниже перечислены причины неудовлетворительной работы теплообменника (повышенного температурного напора).

1. Недостаточная рабочая поверхность теплообмена F , удаление, затопление части трубок.

2. Пониженный коэффициент теплопередачи k вследствие загрязнения поверхности теплообмена с водяной и паровой сторон, неудачного выбора места или недостаточного отсоса воздуха, большого его присоса, особенно в конденсаторе и в подогревателе, где давление пара меньше 1 ага, неисправности паровых или водяных перегородок, замены латунных трубок стальными.

3. Тепловая перегрузка из-за повышенного расхода воды или пониженной температуры воды на входе — для подогревателя; повышенного расхода пара — для конденсатора.

Кроме того, в подогревателе возможны следующие недостатки.

4. Излишнее падение давления в паропроводе в результате неполного открытия задвижек и обратного клапана; малого диаметра трубопровода и арматуры, наличия резких поворотов; при этом в подогревателе снижены давление, температура насыщения пара и температура воды на выходе при нормальном температурном напоре.

5. Перепуск воды помимо подогревателя вследствие неплотности обводных задвижек, клапанов, водяных перегородок; при этом для потока воды через подогреватель температурный напор несколько уменьшается (из-за недогрузки подогревателя), но для всего потока нагрев и конечная температура воды снижаются, а температурный напор возрастает.

Величина перепуска воды определяется по разности температур воды до и после перепуска из выражения (рис. 1-26)

$$G_{\text{пер}} = G_{\text{в}} \frac{t'_{\text{в}2} - t_{\text{в}2}}{t'_{\text{в}2} - t_{\text{в}1}}$$

6. «Пролет» пара при пониженном уровне дренажа в подогревателе (отсутствии гидрозатвора) из-за неисправности водоотводчика.

7. Увеличенный отсос пара с воздухом из подогревателя при отсутствии или большом диаметре ограничительных шайб; при этом (как и в п. 6) пар

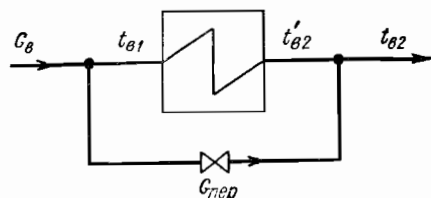


Рис. 1-26. Схема перепуска воды помимо подогревателя.

пар большей теплоценности вытесняет в регенеративной системе пар меньшей теплоценности, что понижает экономичность установки.

8. Излишнее гидравлическое сопротивление по водяной стороне вследствие засорения трубных досок и трубок, уменьшения числа и диаметра трубок, увеличения числа ходов воды, малого сечения или неполного открытия арматуры.

9. Водяная неплотность, т. е. протечка воды в паровое пространство, вызывающая переполнение теплообменника, загрязнение конденсата греющего пара, излишнюю перекачку воды и уменьшение экономичности при каскадной схеме удаления дренажа, искажение баланса пара, воды в установке. Допустимая при испытании протечка составляет не более 0,5% от максимального расхода пара на установку; обычно она меньше 0,1%.

10. Увеличенные потери тепла вследствие наружного охлаждения плохо изолированных горячих поверхностей.

В конденсаторе возможны следующие недостатки:

11. Повышенное паровое сопротивление выхлопного патрубка (больше 3 мм рт. ст.), трубного пучка (больше 4 мм рт. ст.) из-за плохо организованного потока пара, что приводит к повышению давления выхлопа — за последней ступенью.

12. Воздушная и водяная неплотность, неудовлетворительная деаэрация конденсата. Протечка сырой воды должна быть меньше 0,5% от номинального расхода пара в конденсатор (при развальцованных трубках она обычно меньше 0,1%).

Воздушную плотность конденсатора считают отличной, если присос воздуха в него составляет не более

$$G_{\text{возд}}^{\circ} = 1 + \frac{D_{\text{н}}^{\text{к}}}{100} [\kappa\text{г/ч}],$$

хорошей, если

$$G_{\text{возд}} = 2G_{\text{возд}}^{\circ},$$

посредственной, если

$$G_{\text{возд}} = 4G_{\text{возд}}^{\circ},$$

где $D_{\text{н}}^{\text{к}}$ — номинальный расход пара в конденсатор, т/ч [Л. 4].

13. Увеличенное переохлаждение конденсата (больше 1—2° С), которое может оказаться отрицательным при вводе дренажа из подогревателя во всасывающую линию конденсатного насоса, где давление больше, чем в конденсаторе, на высоту водяного столба (0,1—0,2 ата), благодаря чему тепло дренажа используется полностью или частично.

Перечисленные недостатки обнаруживают путем измерений, осмотра, сравнения с проектными и лучшими современными данными.

Основными характеристиками подогревателя являются:

1) температура воды на выходе из подогревателя $t_{\text{к}2} = f(D_1)$,

2) температурный напор $\delta t = f(D_1)$ в зависимости от расхода пара на входе в проточную часть, из которой отбирается пар на подогреватель (рис. 1-27).

С увеличением расхода пара D_1 температура воды $t_{\text{к}2}$ возрастает, следуя за температурой насыщения пара отбора, поскольку $t_{\text{к}2} = t_{\text{нас}} - \delta t$, а δt увеличивается меньше, чем температура насыщения $t_{\text{нас}}$.

Основными характеристиками конденсатора являются:

1) давление пара в конденсаторе $p_2 = t(D^{\text{к}})$,

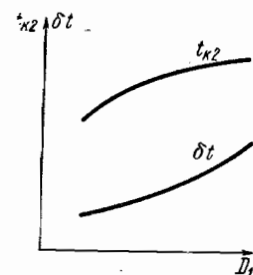


Рис. 1-27. Графики температуры воды на выходе из подогревателя $t_{\text{к}2}$ и величины температурного напора δt в зависимости от расхода пара на входе в проточную часть, из которой пар отбирается на подогреватель.

2) температурный напор $\delta t^k = f(D^k)$ в зависимости от расхода пара в конденсатор при данном расходе и температуре охлаждающей воды (рис. 1-28).

С увеличением расхода пара его давление или температура насыщения $t_{\text{нас}}$ следует за температурой охлаждающей воды $t_{\text{в}2}$ на выходе из конденсатора, поскольку $t_{\text{нас}} = t_{\text{в}2} + \delta t$, а температурный напор δt незначительно возрастает.

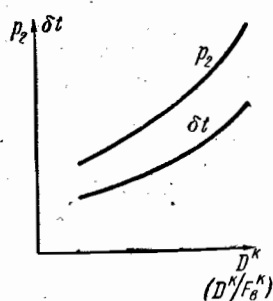


Рис. 1-28. Графики давления p_2 и величины температурного напора δt в конденсаторе в зависимости от расхода пара в конденсатор.

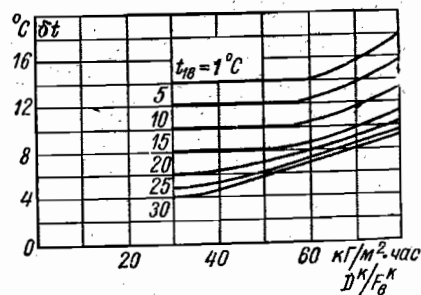


Рис. 1-29. График зависимости температурного напора δt от удельной паровой нагрузки D^k / F_g^k конденсатора и от температуры охлаждающей воды на входе $t_{\text{в}1}$.

Температурный напор имеет повышенное значение при малой паровой нагрузке, низкой температуре охлаждающей воды и большой кратности охлаждения (числа тонн воды на 1 т пара), когда минимум давления в конденсаторе определяется характеристикой эжектора, и $t_{\text{нас}} = \text{const}$, несмотря на снижение $t_{\text{в}2}$.

По имеющимся ориентировочным данным, нормальный температурный напор для двухходового конденсатора в зависимости от температуры охлаждающей воды на входе $t_{\text{в}1}$ равен (рис. 1-29):

$$\delta t = 14^\circ\text{C при } t_{\text{в}1} = 1^\circ\text{C};$$

$$\delta t = 4 \div 9^\circ\text{C при } t_{\text{в}1} = 30^\circ\text{C}.$$

Для современных конденсаторов более правильные данные получаются по типовым графикам, построенным по предложению Л. Д. Бермана в относительных координатах $\delta t / d_k^{\text{н}}$ и $d_k / d_k^{\text{н}}$, где $d_k^{\text{н}}$ — номинальная удельная паровая нагрузка конденсатора [Л. 25].

Кроме того, для современных двухходовых конденсаторов можно привести нормальные значения следующих величин:

удельная паровая нагрузка

$$\frac{D^k}{F_g^k} = 40 \div 50 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч};$$

кратность охлаждения m и средний коэффициент теплопередачи k при нормальном значении D^k / F_g^k и $t_{\text{в}1} = 0 \div 20^\circ\text{C}$:

$$m = \frac{W}{D^k} \approx \frac{530}{\Delta t_{\text{в}}} = 40 \div 80 \text{ м/м};$$

$$k = 1600 \div 2800 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град},$$

где F_g^k — поверхность теплообмена конденсатора с водяной стороны;

W — расход охлаждающей воды.

В подогревателях $\delta t = 0 \div 10^\circ\text{C}$ (большие значения — при давлении пара ниже 1 атм).

О характеристике паровых эжекторов, их эксплуатации, наладке и испытании см. [Л. 4].

4. Тепловая схема установки

Тепловая схема установки включает в себя схему регенеративного подогрева конденсата, регулируемых отборов пара и питания собственных нужд.

Основными показателями экономичности тепловой схемы данной установки можно считать:

1) использование регулируемых и нерегулируемых отборов пара в процентах от предельно допустимого или проектного расхода;

2) энергетическую ценность (p ; t) отбираемого и расходуемого пара, которая должна быть минимальной, т. е.

а) давление в камере отбора $p \leq 1,1 p^k$, где p^k — технически обоснованное наименьшее давление в коллекторе ТЭС, атм;

б) температура насыщения греющего пара (или температура дренажа из другого подогревателя) для теплофикационных и регенеративных теплообменников $t_{\text{нас}} \leq t_{\text{в}1} + 50^\circ\text{C}$, где $t_{\text{в}1}$ — температура нагреваемой воды

на входе в теплообменник; величины, приведенные в п. «а» и «б», имеют ориентировочное значение;

3) величину расхода тепла на собственные нужды и непроизводительных потерь тепла: продувок, дренажей, утечек, от наружного охлаждения, всякого дросселирования пара без выработки электроэнергии (см. п. 1), а также от охлаждения воды, например при каскадном сливе. Эти потери представляют собой энергетические потери в смысле обесценения тепла и наряду с расходом на собственные нужды должны быть минимальными.

Все потери с учетом коэффициента ценности могут быть приведены к свежему пару и выражены в процентах от его расхода на установку.

Оценку экономичности паротурбинной установки как при ее испытании, так и в условиях нормальной эксплуатации можно производить, пользуясь формой приложения 3-19 при надлежащем измерении необходимых величин.

Показатели, приведенные в приложении 3-19, входят также в окончательный отчет по тепловому испытанию установки — см. приложения 5-10 и 10-1.

1-4. ОБЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

1. Общие показатели экономичности паротурбинной установки

Расход тепла на установку Q_1 равен разности между подведенным теплом Q свежего пара и отведенным теплом $Q_{пв}$ питательной воды:

$$Q_1 = Q - Q_{пв}$$

и состоит из расхода тепла Q_3 на производство электроэнергии и отпуска тепла Q^r помимо регенерации (рис. 1-30):

$$Q_1 = Q_3 + Q^r.$$

Расход тепла на производство электроэнергии составит:

$$Q_3 = 860N + \Delta Q_n,$$

где N — внутренняя мощность, отданная паром на вал турбины;

ΔQ_n — потери тепла в процессе производства электроэнергии.

По наличию тепловых потерь ΔQ_n все паротурбинные установки делим на две группы:

1) установки типа К с конденсатором, в которых $\Delta Q_n \leq 0,7Q_1$ представляют потерю тепла в конденсаторе на нагрев охлаждающей воды;

2) установки типа П без конденсатора (с противодавлением), в которых $\Delta Q_n = 0$ и $Q_3 = 860N$.

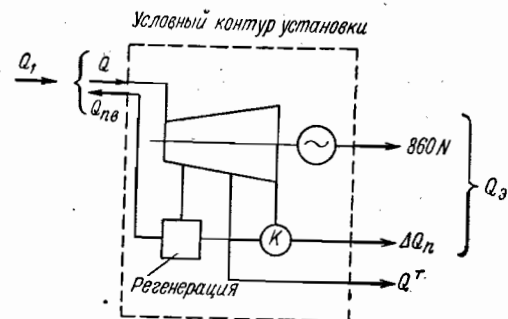


Рис. 1-30. Принципиальная схема паротурбинной установки с регенеративными и регулируемыми отборами пара.

Электромеханические потери, а также расход тепла и электроэнергии на собственные нужды, присущие обоим типам установок, пока не учитываем.

а) Установка типа К

В установке типа К пар из последней ступени поступает в конденсатор, и его теплота парообразования не используется.

Общим показателем экономичности установки типа К является удельный расход тепла q_1 на производство 1 кВт·ч:

$$q_1 = \frac{Q_3}{N} = 860 + \frac{\Delta Q_n}{N} \text{ [ккал/кВт·ч]} \quad (1-13)$$

или абсолютный электрический к. п. д. $\eta_{аз}$ установки:

$$\eta_{аз} = \frac{860}{q_1}, \quad (1-14)$$

где N — выработка электроэнергии, кВт·ч/ч.

Таким образом, экономичность установки типа К

зависит от одной переменной величины — от удельной потери тепла в конденсаторе, $\text{ккал/квт} \cdot \text{ч}$.

При отсутствии отборов пара

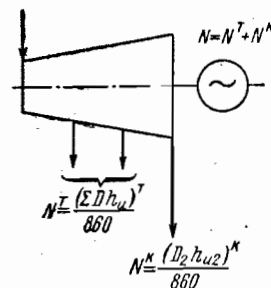
$$\frac{\Delta Q_{\text{п}}}{N} = \frac{860 (i_2^{\text{к}} - i_{\text{к}}^{\text{к}})}{h_{\text{н}2}^{\text{к}}}, \quad (1-15)$$

где $\frac{860}{h_{\text{н}2}^{\text{к}}}$ — расход пара в конденсатор, $\text{кг/квт} \cdot \text{ч}$;

$h_{\text{н}2}^{\text{к}} = i_1 - i_2^{\text{к}}$ — использованное теплопадение пара до конденсатора, ккал/кг ;

$i_2^{\text{к}} - i_{\text{к}}^{\text{к}}$ — разность теплосодержаний пара и конденсата или потери тепла 1 кг пара в конденсаторе, обычно $i_2 - i_{\text{к}}^{\text{к}} \approx 530 \text{ ккал/кг}$.

При наличии отборов пара мощность N установки типа К складывается из двух частей:



$$N = N^T + N^K,$$

где N^T — теплофикационная мощность потоков отбираемого пара:

$$N^T = \frac{(\sum D h_{\text{н}})^T}{860};$$

N^K — конденсационная мощность «сквозного» потока пара в конденсатор (рис. 1-31):

$$N^K = \frac{(D h_{\text{н}2})^K}{860}.$$

Рис. 1-31. Схема конденсационной и теплофикационной выработки электроэнергии.

Следовательно, удельные потери тепла в конденсаторе на 1 $\text{квт} \cdot \text{ч}$ установки будут равны:

$$\frac{\Delta Q_{\text{п}}}{N} = \frac{860 (i_2^{\text{к}} - i_{\text{к}}^{\text{к}})}{h_{\text{н}2}^{\text{к}}} \cdot \frac{N^K}{N} [\text{ккал/квт} \cdot \text{ч}],$$

а удельный расход тепла:

$$q_1 = 860 \left(1 + \frac{i_2^{\text{к}} - i_{\text{к}}^{\text{к}}}{h_{\text{н}2}^{\text{к}}} \cdot \frac{N^K}{N} \right) [\text{ккал/квт} \cdot \text{ч}]. \quad (1-16)$$

Из выражения (1-16) видно, что экономичность установки типа К с регенеративными отборами пара зависит от величин $h_{\text{н}2}^{\text{к}}$, $i_{\text{к}}^{\text{к}}$, N^K/N , а также от i_1 , поскольку $i_2^{\text{к}} = i_1 - h_{\text{н}2}^{\text{к}}$.

Понижение удельного расхода тепла q или повышение абсолютного электрического к. п. д. установки в результате применения регенерации тем больше, чем больше теплофикационная мощность, развиваемая отбираемым паром и чем меньше конденсационная мощность N^K/N в долях от полной мощности установки.

б) Установка типа П

В установке типа П все тепло отводимого пара используется для теплофикации, для регенеративного подогрева конденсата.

В любой установке типа П

$$q_1 \approx 860 [\text{ккал/квт} \cdot \text{ч}] \text{ и } \eta_{\text{аэ}} \approx 1.$$

Поэтому для сравнительной оценки таких установок применяется другой показатель.

Установки типа П (исключая предвключенные турбины) нагружают по тепловому графику, а недостающую электрическую мощность получают от установок типа К, работающих в параллель (в одном агрегате, на одной станции, в одной системе). Общие же тепловые потери зависят от величины конденсационной мощности, равной

$$N^K = N - N^T,$$

где N — общая нагрузка агрегата, ТЭС, энергосистемы.

Чем больше теплофикационная мощность N^T , тем меньше конденсационная мощность N^K и связанные с ней потери в конденсаторе.

Следовательно, экономичность установки типа П определяется абсолютной величиной ее мощности N^T при данном отпуске тепла Q^T .

Общим показателем экономичности установки типа П является удельная теплофикационная выработка электроэнергии:

$$y^T = \frac{N^T}{Q^T} = \frac{\sum D h_{\text{н}}^T}{860 \sum D (i^T - i_{\text{к}}^T)} [\text{квт} \cdot \text{ч/ккал}].$$

Для 1 кг пара, отводимого из отбора или на выхлопе,

$$y^T = \frac{h_n^T}{860} \cdot \frac{1}{i^T - i_k^T} [\text{квт} \cdot \text{ч/ккал}], \quad (1-17)$$

где h_n^T — использованное теплопадение отводимого пара:

$$h_n^T = i_1 - i^T;$$

$i^T - i_k^T$ — теплоиспользование 1 кг пара или разность теплосодержаний отводимого пара и возвращаемого конденсата.

Обычно $i^T - i_k^T \approx 550$ ккал/кг, поскольку i_k^T принимают равным теплосодержанию воды при температуре насыщения по давлению в отборе (полагая, что возвращаемый конденсат догревается паром того же отбора).

Из выражения (1-17) видно, что экономичность установки типа П зависит главным образом от использованного теплопадения h_n^T для отводимого потока пара.

Экономия тепла за счет вытеснения конденсационной мощности теплофикационной мощностью при наличии регенеративных отборов пара или вытеснения пара одного отбора паром другого отбора определяется следующим путем. Введем следующие обозначения:

N^k — мощность вытесняемого «сквозного» потока пара в конденсатор (для данной установки или наименее экономичной в энергосистеме);

N^T — мощность «сквозного» потока пара в регулируемый отбор;

$N^{k_1} = N^k \varphi^k$ — мощность вытесняемого «сквозного» потока пара в конденсатор и приходящихся на него регенеративных отборов пара;

$N^{T_1} = N^T \varphi^T$ — мощность «сквозного» потока пара в регулируемый отбор и приходящихся на него регенеративных отборов пара.

Тогда мощность «сквозного» потока пара в конденсатор, вытесняемая паром отбора (при $N^{T_1} = N^{k_1}$), равна:

$$N^k = \frac{N^{k_1}}{\varphi^k} = \frac{N^{T_1}}{\varphi^k} = N^T \frac{\varphi^T}{\varphi^k},$$

а экономия тепла в час составит:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{860 (i_2^k - i_k^k)}{h_{n2}^k} N^T \frac{\varphi^T}{\varphi^k} [\text{ккал/ч}].$$

Подставляя выражение мощности 1 кг пара «сквозного» потока в отбор $h_{n2}^T/860$ вместо N^T , получим экономию тепла за счет 1 кг пара отбора:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{(i_2^k - i_k^k) h_{n2}^T}{h_{n2}^k} \cdot \frac{\varphi^T}{\varphi^k} [\text{ккал/кг}].$$

Экономия тепла за счет 1 ккал тепла, отдаваемого паром отбора потребителю, составит:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{(i_2^k - i_k^k) h_{n2}^T \varphi^T}{(i^T - i_k^T) h_{n2}^k \varphi^k} [\text{ккал/кг}].$$

Подставляя ориентировочные значения $i_2^k - i_k^k$ и $i^T - i_k^T$, приведенные на стр. 54 и 56, находим экономию тепла в процентах от отпуска тепла:

$$Q_{\text{эк}} \approx \frac{530 h_{n2}^T \varphi^T}{550 h_{n2}^k \varphi^k} \cdot 100 = 96 \frac{h_{n2}^T \varphi^T}{h_{n2}^k \varphi^k}.$$

Отношение h_{n2}^T/h_{n2}^k можно выразить через теплоемкость пара отбора (см. стр. 18) следующим образом:

$$\frac{h_{n2}^T}{h_{n2}^k} = 1 - \xi^T.$$

При вытеснении пара одного отбора паром другого отбора (или паром противодавления у турбины типа П) экономия ($\pm$) будет равна разности величин экономии для каждого из них по сравнению со «сквозным» потоком пара в конденсатор:

$$Q_{\text{эк}} = 96 \frac{h_{n2}^T \varphi^T - h_{n2}^{T_1} \varphi^{T_1}}{h_{n2}^k \varphi^k} [\%].$$

В частном случае — при отсутствии регенеративных отборов пара — $\varphi^T = 1$ и $\varphi^k = 1$.

Для установки типа ВПТ-25 коэффициенты φ^T и φ^k имеют следующие приблизительные значения:

для пара промышленного отбора $\varphi_P = 1,08$
 » теплофикационного отбора $\varphi_T = 1,10$
 » потока пара в конденсатор $\varphi^k = 1,12$

Отметим, что удельная теплофикационная выработка электроэнергии для 1 кг пара отбора или на выходе (в установках типа П) с учетом мощности связанных с ним регенеративных отборов составляет $y_p^T = y^T \Phi^T$, где y^T — см. выражение (1-17).

2. Тепловые характеристики паротурбинной установки

Тепловыми характеристиками всей установки в целом являются графические или аналитические выражения взаимной зависимости величин расхода пара и тепла на установку, ее электрической мощности, а также отпуска пара и тепла на сторону (для установок типа П или К с регулируемым отбором пара).

В зависимости от типа установки ее основными характеристиками являются:

Установка типа К без регулируемого отбора пара

- 1) часовой расход свежего пара $D_1 = f(N_g)$;
- 2) часовой расход тепла $Q_1 = f(N_g)$ в зависимости от мощности на зажимах генератора.

Установка типа К с регулируемым отбором пара

- 1) часовой расход свежего пара $D_1 = f(N_g; D_n; D_r)$;
- 2) часовой расход тепла $Q_1 = f(N_g; Q_n; Q_r)$ в зависимости от мощности на зажимах генератора и отпуска пара, тепла из регулируемых отборов (одного, двух).

Установка типа П без регулируемого отбора пара

- 1) часовой расход свежего пара $D_1 = f(N_g)$ в зависимости от мощности на зажимах генератора;
- 2) мощность на зажимах генератора $N_g = f(Q_2)$ в зависимости от отпуска тепла паром противодавления (на выходе);
- 3) расход тепла на выработку электроэнергии $Q_s = f(N_g)$.

Установка типа П с регулируемым отбором пара

- 1) часовой расход свежего пара $D_1 = f(N_g; D^T)$ в зависимости от мощности на зажимах генератора и расхода пара из регулируемого отбора;
- 2) мощность на зажимах генератора $N_g = f(Q^T; Q_2)$ в зависимости от полного отпуска тепла Q^T и тепла Q_2 с паром регулируемого отбора;
- 3) расход тепла на выработку электроэнергии $Q_s = f(N_g)$.

Кроме того, представляют непосредственный интерес характеристики по удельному расходу пара d [кг/квт·ч] и тепла q [ккал/квт·ч] для установки типа К и по удельной теплофикационной выработке электроэнергии y [квт·ч/ккал или квт·ч/Мккал] для установки типа П, получаемые из основных характеристик.

Характеристиками предвключенной установки являются:

- 1) часовой расход пара $D_1 = f(N_g)$;
- 2) часовой расход тепла на выработку электроэнергии $Q_1 = f(N_g)$;
- 3) относительный электрический к. п. д. установки $\eta_{оэ} = f(D_1)$ или $\eta_{оэ} = f(N_g)$.

Расход пара на установку не является достаточным показателем экономичности, но от него зависят показатели экономичности работы всех элементов установки, а также нагрузка котельной, что имеет большое значение.

3. Часовой расход свежего пара на установку

Форма характеристики по расходу свежего пара зависит от системы парораспределения, от наличия регулируемых и нерегулируемых отборов пара.

а) Характеристика $D_1 = f(N_g)$ установок типов К и П без отборов пара

Дроссельное парораспределение.
Из общего уравнения $860N = D_1 h_u$ следует:

- 1) $N = 0$ при $D_1 = 0$, * т. е. линия $D_1 = f(N)$ проходит через начало координат (рис. 1-32);

* Кроме того, $N \leq 0$ при $h_u \leq 0$, или $\eta_{во} \leq 0$.

2) в любой точке характеристики удельный расход пара

$$d_1 = \frac{D_1}{N} = \frac{860}{h_{и}} [\text{кг/квт} \cdot \text{ч}],$$

т. е. зависит от использованного теплопотока $h_{и}$, а при неизменном внутреннем относительном к. п. д. $\eta_{в0}$ — от располагаемого теплопотока h_0 или от начальных и конечных параметров пара.

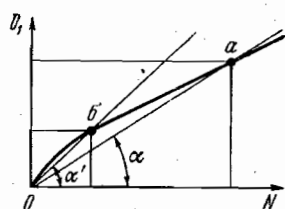


Рис. 1-32. Характеристика $D_1 = f(N)$ установки без отборов пара с дроссельным парораспределением.

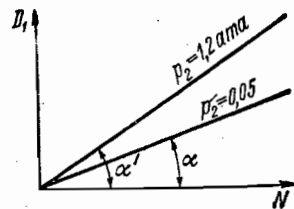


Рис. 1-33. Характеристика $D_1 = f(N)$ установки без отборов пара при $\eta_{в0} = \text{const}$ в зависимости от конечного давления.

Например, при $p_1 = 29 \text{ ата}$, $t_1 = 400^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,05 \text{ ата}$ и $\eta_{в0} = 80\%$ получаем:

$$h_0 = 267 \text{ ккал/кг}; \quad d_1 = \frac{860}{267 \cdot 0,8} = 4,02 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч};$$

при тех же значениях p_1 , t_1 и $\eta_{в0}$, но при $p_2 = 1,2 \text{ ата}$,

$$h_0 = 163 \text{ ккал/кг}; \quad d_1 = \frac{860}{163 \cdot 0,8} = 6,6 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$$

(см. α и α' на рис. 1-33, где $d_1 = \text{tg } \alpha$, а $d_1' = \text{tg } \alpha'$).

С уменьшением расхода свежего пара при заданных его параметрах внутренний относительный к. п. д. $\eta_{в0}$ турбины и использованное теплопотока $h_{и}$ уменьшаются (см. стр. 42), а удельный расход пара d_1 увеличивается. Следовательно, линия $D_1 = f(N)$ является кривой, направленной выпуклостью вверх. Это особенно заметно вблизи холостого хода (рис. 1-32):

$$\text{tg } \alpha' > \text{tg } \alpha.$$

Если все точки кривой на рис. 1-32 сместить влево на величину электромеханических потерь $\Delta N_{эм}$ (см.

стр. 245), то получим характеристику $D_1 = f(N_3)$ — рис. 1-34.

Величина $\Delta N_{эм}$ возрастает с увеличением нагрузки, отчего кривизна линии $D_1 = f(N_3)$ несколько меньше, чем линии $D_1 = f(N)$.

Отрезки $D_{xxф}$ и $N_{xxф}$ на рис. 1-34 изображают фактические величины расхода пара и мощности при холостом ходе турбины.

При аналитическом выражении характеристику $D_1 = f(N_3)$ в рабочей зоне нагрузки (от 40 до 100 % номи-

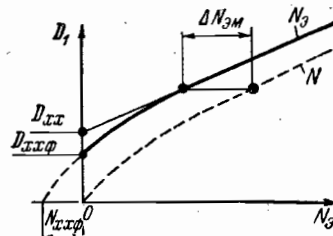


Рис. 1-34. Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки без отборов пара с дроссельным парораспределением.

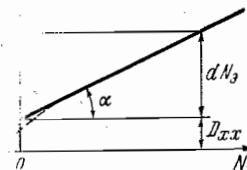


Рис. 1-35. Спрявленная характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки без отборов пара с дроссельным парораспределением.

нальной) принято спрямлять, вследствие чего так называемый условный расход пара на холостой ход, отсекаемый условной прямой на оси D_1 , больше фактического расхода (рис. 1-34):

$$D_{xx} > D_{xxф}.$$

Спрявление дает удобное для практики выражение

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 \quad (1-18)$$

с постоянным значением коэффициента a , определяемого геометрически из графика, построенного по опытным точкам (рис. 1-35):

$$a = \frac{D_1 - D_{xx}}{N_3} = \text{tg } \alpha, \quad (1-19)$$

откуда

$$a = d_1 - \frac{D_{xx}}{N_3}. \quad (1-20)$$

Величину a называют относительным приростом расхода пара ($\text{кг/квт}\cdot\text{ч}$), дополнительным удельным расходом пара, или угловым коэффициентом характеристики $D_1 = f(N_3)$. Величины D_{xx} и a тем больше, чем меньше использованное теплопадение h_n , например, чем больше давление выхлопа p_2 .

Дроссельное обводное парораспределение. При дроссельном обводном парораспределении с момента перегрузки (открытия перегрузочного

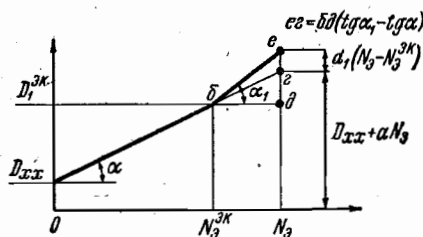


Рис. 1-36. Спрямленная характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки без отборов пара с дроссельным обводным парораспределением.

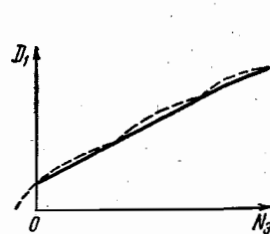


Рис. 1-37. Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки с сопловым парораспределением.

клапана) среднее использованное теплопадение в установке h_{ncp} падает (см. стр. 38), вследствие чего происходит увеличение удельного расхода пара d_1 , т. е. излом характеристики $D_1 = f(N_3)$ вверх в точке б (рис. 1-36). Каждая точка характеристики по-прежнему определяется выражением

$$d_1 = \frac{860}{h_n}.$$

При аналитическом выражении участок характеристики в зоне перегрузки также спрямляют; здесь ее угловой коэффициент больше, чем до перегрузки:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 > \operatorname{tg} \alpha.$$

Нагрузка турбины $N_3^{\text{жк}}$ в момент начала перегрузки называется экономической.

Аналитическое выражение характеристики $D_1 = f(N_3)$ в зоне $N_3 < N_3^{\text{жк}}$ [см. выражение (1-18)]

$$D_1 = D_{xx} + aN_3;$$

в зоне $N_3 > N_3^{\text{жк}}$

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 + a_1(N_3 - N_3^{\text{жк}}), \quad (1-21)$$

где $a_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 1-35).

Излом этой характеристики вверх в точке б тем круче, чем ниже давление в камере перегрузки и выше на выхлопе по отношению к давлению свежего пара (см. стр. 39); он означает ухудшение экономичности турбины с увеличением нагрузки сверх $N_3^{\text{жк}}$.

Так, например, из-за меньшего дросселирования пара поочередная последовательная перегрузка до максимума нескольких однотипных турбин (типа АК-50) экономически выгоднее параллельной их перегрузки.

Аналитическое выражение характеристики $D_1 = f(N_3)$ с несколькими изломами имеет следующий вид:

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 + a_1(N_3 - N_{31}) + a_2(N_3 - N_{32}) + \dots + a_n(N_3 - N_{3n}),$$

где N_{31}, N_{32}, N_{3n} — мощность на зажимах генератора в точках первого, второго и n -го изломов характеристики;

a_1, a_2, a_n — разность между угловым коэффициентом характеристики в зоне нагрузки от первого до второго излома, от второго до третьего, от $n-1$ до n -го и его значением (a) в зоне нагрузки от нуля до первого излома.

Приведенное выражение справедливо лишь для значений $N_3 > N_{3n}$ и потому является условным.

Значение $N_3^{\text{жк}}$ не постоянно для одной и той же установки; оно уменьшается с понижением начальных параметров и с повышением конечного давления пара в турбине и зависит от работы парораспределения, а также от тепловой схемы установки.

Сопловое парораспределение. При сопловом парораспределении характеристика $D_1 = f(N_3)$ имеет вид волнистой кривой: начало каждой волны отвечает началу открытия очередного клапана (рис. 1-37).

Волны образуются за счет изменения к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ регулирующей ступени, включая дросселирование в клапанах (см. стр. 32).

Практически эти волны мало заметны, если доля мощности регулирующей ступени невелика и открытие клапанов происходит с перекрышей, т. е. если при неполном открытии одного клапана открывается очередной клапан.

Аналитическое выражение спрямленной характеристики $D_1 = f(N_3)$ такое же, как при дроссельном парораспределении, — см. выражения (1-18) и (1-21) в зависимости от наличия перегрузки.

б) Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки с отборами пара на регенерацию

Из общего уравнения $860N = D_1 h_{н\text{ ср}}$ для установки с отборами пара на регенерацию следует, что ее характеристика $D_1 = f(N_3)$ по форме такая же, как и для установки без отборов пара (рис. 1-38).

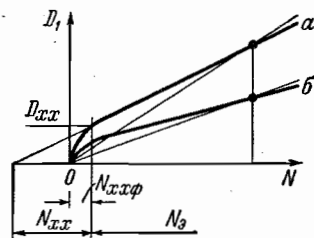


Рис. 1-38. Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки с регенеративным отбором пара и без отборов: а — с регенеративным отбором; б — без отборов.

В любой точке характеристики $D_1 = f(N_3)$ удельный расход пара равен:

$$d'_1 = \frac{D_1}{N} = \frac{860}{h_{н\text{ ср}}}.$$

При заданных параметрах p_1, t_1, p_2 величина $h_{н\text{ ср}}$ меньше, чем h_n для «сквозного» потока пара, а d'_1 больше, чем d при отсутствии регенерации (рис. 1-38).

На величину D_{xx} спрямленной характеристики влияет характер изменения величины $h_{н\text{ ср}}$ или расхода пара из отборов в зависимости от мощности. Аналитическое выражение характеристики $D_1 = f(N_3)$ такое же, как

и для установки без отборов пара, — см. выражения (1-18) и (1-21), а значения коэффициентов a и a_1 больше — см. выражение (1-20).

Во всех рассмотренных случаях спрямление заметно искажает действительную характеристику $D_1 = f(N_3)$ только в зоне, близкой к холостому ходу, а при номинальной мощности (или экономической при обводном регулировании) оставляет ее без изменения.

Поэтому, выражая расход свежего пара на холостой ход в долях x от расхода при номинальной (или экономической) мощности, получаем для спрямленной характеристики по рис. 1-39 следующие выражения:

$$D_1 = aN_y,$$

$$a = \frac{D_1^H (1-x)}{N_3^H} = (1-x) d_1^H,$$

$$N_y = N_3 + N_{xx} = N_3 + xN_y^H = N_3 + \frac{x}{1-x} N_3^H,$$

$$D_1 = xD_1^H + (1-x) d_1^H N_3, \quad (1-22)$$

где D_1^H и d_1^H — часовой и удельный расходы свежего пара при номинальной мощности N_3^H ;

N_y и N_y^H — условная мощность установки по спрямленной характеристике и ее значение при N_3^H (см. рис. 1-39).

Для установки с конденсатором без регулируемых отборов пара величина x близка к 0,05.

Представление об относительной величине расхода пара на холостой ход дает следующий приближенный расчет.

Приближенный расчет условного расхода пара на холостой ход. В табл. 1-3 приведено определение условного расхода пара на холостой ход расчетным путем для различных относительных давлений выхлопа в долях от давления свежего пара.

Расчет сделан для установки с дроссельным парораспределением (без перегрузки) без отборов пара при следующих допущениях, не имеющих существенного значения для погрешности результата:

Таблица 1-3

№ пп.	Наименование величины	Значение величины			Формула, способ определения. Примечания
		< 0,001	0,1	0,3	
1	Относительное давление выхлопа в долях от давления свежего пара p_2/p_1				
2	Относительное давление за дроссельным клапаном в долях от давления свежего пара $p_{др}/p_1$	0,4	0,4	0,48	По формуле на стр. 28 при $\delta D_1 = 0,4$, т. е. $D_1 = 0,4 D_1^H$
3	Коэффициент дросселирования $\eta_{др}$	0,90	0,66	0,44	Для $i_1 = 800$ ккал/кг
4	Относительная мощность в долях от внутренней номинальной мощности установки δN	0,36	0,26	0,18	$\delta N = \delta D_1 \eta_{др} = 0,4 \eta_{др}$, поскольку $h_0 = \text{const}$, $\eta_{во} = \text{const}$ и $N = D_1 h_0 \eta_{др} \eta_{во} : 860$
5	Угловой коэффициент спрямленной характеристики $D_1 = f(N_9)$ в долях от удельного расхода пара при номинальной мощности a/d_1^H	$0,94 \eta_{эм}^H$	$0,81 \eta_{эм}^H$	$0,73 \eta_{эм}^H$	$\frac{a}{d_1^H} = \frac{(1 - \delta D_1) D_1^H}{(1 - \delta N) N_9^H} \frac{\eta_{эм}^H}{D_1^H} = \frac{1 - \delta D_1}{1 - \delta N} \eta_{эм}^H$
6	Условный расход пара на холостой ход в долях от расхода при номинальной мощности x	0,09	0,21	0,29	$x = \frac{D_1^H - a N_9^H}{D_1^H} = 1 - \frac{a}{d_1^H}$ Принимаем $\eta_{эм}^H = 0,97$

1) спрямленная характеристика $D_1 = f(N_9)$ установки проходит через две точки действительной характеристики:

$$D_1 = D_1^H$$

и

$$D_1 = 0,4 D_1^H,$$

где D_1^H — расход свежего пара при номинальной мощности; при наличии перегрузки вместо D_1^H следует принять расход пара в точке первого излома характеристики $D_1 = f(N_9)$;

2) значения внутреннего относительного к. п. д. portionsной части, исключая дросселирование, при указанных расходах пара одинаковы, т. е. использованные теплопадения $h_{и}$ отличаются лишь на величину потерь, связанных с дросселированием пара;

3) электромеханические потери по абсолютной величине в киловаттах постоянны (при номинальной мощности принято $\eta_{эм} = 0,97$).

Условный расход пара x на холостой ход по расчету в табл. 1-3 для относительных давлений выхлопа меньше 0,001; 0,1 и 0,3 составляет соответственно 0,09; 0,21 и 0,29 расхода при номинальной (или экономической) мощности.

При сопловом парораспределении (где изменения теплопадения $h_{и}$ менее значительны), а также при наличии нерегулируемых отборов пара (для которых $h_{и} \approx \text{const}$) разница между средними значениями $h_{и\text{ср}}$ для расходов пара D_1^H и $0,4 D_1^H$ меньше и, следовательно, условный расход пара на холостой ход меньше, чем по табл. 1-3. При отборе пара на регенерацию, составляющем 0,2—0,3 расхода свежего пара, можно полагать величину x равной 0,85—0,75 ее значения при тех же условиях без регенерации.

Из выражений, приведенных в пп. 4 и 6 табл. 1-3, видно влияние коэффициента дросселирования $\eta_{др}$ (точнее $\eta_{др} \eta_{во}$) и электромеханических потерь $\eta_{эм}$ на величину x ; так, при $\eta_{др} \eta_{во} = \text{const}$ получаем $x = 1 - \eta_{эм}$.

Можно заметить, что в случае выбора для спрямленной характеристики точки с расходом свежего пара, равным $0,3 D_1^H$ вместо $0,4 D_1^H$ величина x получилась бы несколько меньшей.

в) Характеристика $D_1 = f(N_3; D^T)$ установок типов К и П с одним регулируемым отбором пара

Режим нагрузки и тепловой процесс турбины с регулируемым отбором ввиду их сложности требуют специального рассмотрения.

Проточная часть турбины с регулируемым отбором пара состоит из двух последовательных по ходу пара проточных частей:

1) части высокого давления (ч. в. д.) — от паровпуска до камеры регулируемого отбора;

2) части низкого давления (ч. н. д.) — от камеры регулируемого отбора до выхлопа.

Характер теплового процесса в каждой части, как отдельной турбины, зависит от расхода пара и от системы парораспределения (см. стр. 35); расход пара и его параметры, начальные — для ч. н. д. и конечные — для ч. в. д., связаны с режимом электрической и тепловой нагрузок всей установки.

Так, например, расход свежего пара в ч. в. д. (исключая регенерацию) должен быть равен сумме расходов в регулируемый отбор и в ч. н. д.

Расход пара в отбор зависит от его потребления, т. е. от тепловой нагрузки. Расход в ч. н. д. при выхлопе в конденсатор соответствует необходимой электрической мощности сверх развиваемой ч. в. д., т. е. зависит от электрической нагрузки установки, поскольку она равна сумме внутренних мощностей ч. в. д. и ч. н. д., за вычетом электромеханических потерь.

Постоянное давление на выходе из ч. в. д. поддерживается регулятором давления, воздействующим на парораспределение ч. н. д. и ч. в. д. При сокращении отбора регулятор давления увеличивает перепуск пара в ч. н. д. и сокращает его расход в ч. в. д., а при увеличении отбора производит обратное действие.

С момента полного открытия парораспределения ч. н. д. дальнейшее воздействие на него регулятора давления прекращается. Необходимое, по условиям электрической нагрузки, дополнительное увеличение расхода пара в ч. н. д. достигается при «естественном», пропорциональном расходу, повышении давления перед ч. н. д. (если регулятор не установлен на максимально допустимое давление в камере отбора).

Температура отбираемого пара (на выходе из ч. в. д.) непостоянна. Она повышается с уменьшением расхода пара в ч. в. д. вследствие понижения внутреннего относительного к. п. д. ч. в. д. (включая потери дросселирования в регулирующих клапанах) при постоянном давлении в камере отбора после ч. в. д. Она повышается также при «естественном» повышении давления на выходе из ч. в. д. из-за уменьшения в ней располагаемого теплопадения.

Конструкцией или заводской сборкой паровпускных органов ч. н. д. (клапанов, поворотных диафрагм) предусматривается оставление в них открытых проходов при полном смещении сервомотора в сторону закрытия парораспределения. Площадь этих проходов устанавливается из расчета, чтобы при минимальном допустимом давлении в камере регулируемого отбора, оговоренном в технических условиях на турбину, пропуск пара в ч. н. д. был достаточным для отвода тепла, развиваемого трением лопаток ч. н. д. в паре, при допустимой температуре пара на выхлопе.

Вместе с тем указанный пропуск пара не должен быть излишним, что необходимо для уменьшения вынужденной конденсационной мощности при теплофикационном режиме работы турбины и для ее защиты от разгона обратным паром из линии теплофикационного отбора в случае сброса электрической нагрузки.

При выхлопе в конденсатор ч. н. д. можно рассматривать как конденсационную турбину.

Возможные режимы нагрузки турбины с регулируемым отбором пара и соответствующие им характеристики $D_1 = f(N_3; D^T)$ установки можно свести к следующим четырем видам:

1. Теплофикационный режим с включенным регулятором давления отбора. При этом режиме весь пар, выходящий из ч. в. д., за вычетом небольшого расхода пара на регенерацию и в ч. н. д. для ее охлаждения, отбирается на теплофикацию. Мощность установки равна сумме внутренней мощности ч. в. д. и незначительной при данном режиме мощности ч. н. д., вырабатываемой охлаждающим паром, за вычетом электромеханических потерь установки.

Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки при данном режиме строится по заранее полученным аналогичным

характеристикам отдельно для ч. в. д. и ч. н. д. с учетом регенерации и всех других условий реального процесса, как для самостоятельных турбин, рассмотренных выше. По вертикали откладывают расход свежего пара на установку, а по горизонтали — сумму внутренних мощностей ч. в. д. и ч. н. д., найденных по их характеристикам соответственно расходу пара на входе в каждую часть, за вычетом электромеханических потерь установки. Ввиду незначительной мощности ч. н. д. при данном режиме характеристика установки близка к характеристике ч. в. д. или к характеристике установки при условном нулевом расходе пара в ч. н. д.

2. Конденсационный режим с включенным регулятором давления отбора, т. е. без регулируемого отбора пара, но при постоянном заданном давлении в камере отбора. В этом случае расход пара в ч. н. д. отличается от расхода в ч. в. д. лишь на величину регенеративных отборов перед ч. н. д.

Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки при данном режиме аналогична характеристике конденсационной турбины, состоящей из ч. в. д. и ч. н. д., и может быть построена непосредственно по данным испытания установки при этом режиме, либо по имеющимся отдельным характеристикам ч. в. д. и ч. н. д. (см. п. 1).

3. Конденсационный режим с выключенным регулятором давления отбора. Этот режим характеризуется постоянным полным открытием парораспределения ч. н. д. и отсутствием регулируемого отбора пара для теплофикации.

Характеристика $D_1 = f(N_3)$ установки при данном режиме аналогична ее характеристике при конденсационном режиме с включенным регулятором (см. п. 2), но расположена ниже (расход пара меньше) благодаря отсутствию дросселирования на входе пара в ч. н. д.

В зоне полного открытия парораспределения ч. н. д. характеристики установки при режимах с включенным и выключенным регулятором совпадают.

Характеристика для режима с выключенным регулятором не помещается на диаграмме режимов, но она может быть, в случае надобности, нанесена на ней дополнительно.

4. Комбинированный режим с регулируемым отбором пара и с расхо-

дом пара в конденсатор выше минимального при включенном регуляторе давления отбора. К построению характеристики $D_1 = f(N_3)$ установки при этом режиме относится сказанное выше в п. 1. Эти характеристики с целью облегчения пользования диаграммой режимов строят для ряда постоянных окружающих значений расхода пара регулируемого отбора от нуля до максимума и для аналогичных постоянных пропусков пара в ч. н. д. от минимума до максимума.

Таким образом, вся диаграмма режимов представляет собой сетку из линий для различных режимов с постоянными расходами пара в отбор и в ч. н. д., ограниченную линиями:

- а) максимально допустимого расхода свежего пара;
- б) максимального и минимального пропуска пара в ч. н. д.;

в) максимальной мощности генератора;

г) нулевого отбора пара на теплофикацию.

Характеристика $D_1 = f(N_3; D^T)$ установки или диаграмма режимов на рис. 1-40 изображает зависимость расхода свежего пара от мощности на зажимах генератора и от расхода пара регулируемого отбора при всех режимах нагрузки.

Линия АБ характеризует теплофикационный режим с минимальным расходом пара в ч. н. д. и в основном отражает характеристику $D_1 = f(N)$ ч. в. д.

Линия АД относится к режиму с регулируемым отбором пара, равным нулю, и является характеристикой $D_1 = f(N_3)$ всей установки при конденсационном режиме нагрузки (с учетом регенерации и при постоянном давлении в камере регулируемого отбора).

Некоторые линии, например $вг$, почти параллельные

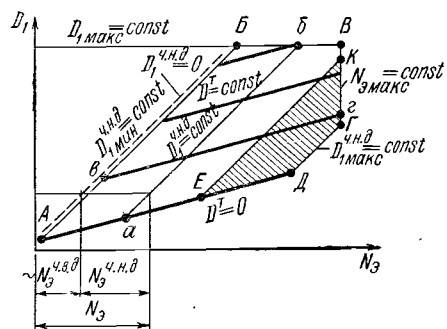


Рис. 1-40. Диаграмма режимов по расходу свежего пара $D_1 = f(N_3; D^T)$ для установки с одним регулируемым отбором пара.

АД, изображают зависимость $D_1 = f(N_3; D^T)$ установки для разных постоянных значений D^T расхода пара из регулируемого отбора.

Ряд линий, например *аб*, почти параллельных *АБ*, изображает зависимость $D_1 = f(N_3; D^T)$ для разных постоянных значений $D_1^{ч. н. д.}$ расхода пара в ч. н. д.

Диаграмма режимов по расходу пара имеет следующие граничные линии и точки:

АБ — линия минимального расхода пара в ч. н. д.; отложенные на ней значения D^T являются предельными — наибольшими для соответствующих расходов свежего пара D_1 ;

ВВ — линия максимального расхода свежего пара $D_{1\text{ макс}}$;

ВГ — линия максимальной мощности на зажимах генератора $N_{3\text{ макс}}$;

ГД — линия максимального расхода пара в ч. н. д. ($D_{1\text{ макс}}^{ч. н. д.}$) при наибольшем допустимом давлении $p_{\text{макс}}^T$ в камере регулируемого отбора и полном открытии парораспределения ч. н. д. При постоянном давлении $p_{\text{макс}}^T$ величина $D_{1\text{ макс}}^{ч. н. д.}$ несколько возрастает с увеличением расхода свежего пара за счет понижения температуры пара в камере отбора;

ЕК — то же, что линия *ГД*, но при наименьшем давлении в камере регулируемого отбора;

АД — линия нулевого расхода пара регулируемого отбора;

Б — точка, соответствующая максимальному отбору пара при минимальной конденсационной мощности, т. е. при минимальном расходе пара через ч. н. д. в конденсатор;

В — точка, соответствующая максимальному расходу отбираемого пара при допустимой наибольшей мощности генератора;

Г — точка наименьшего расхода свежего пара при максимальной мощности генератора;

Д — точка наибольшей мощности при нулевом расходе пара регулируемого отбора, ограниченного пропуском пара в ч. н. д. или наибольшим давлением в камере отбора. Эта мощность обычно близка к номинальной.

На диаграмме заштрихована зона режимов нагрузки

при полностью открытом парораспределении ч. н. д. и переменном давлении в камере регулируемого отбора пара от минимума (для данных условий) до максимума по проектным данным.

Суммарный расход пара из нерегулируемых отборов ч. в. д. определяют из выражения

$$D_p^{ч. в. д.} = D_1 - D^T - D_1^{ч. н. д.},$$

для которого все величины указаны на диаграмме режимов.

Аналитическое выражение спрямленных линий диаграммы режимов имеет следующий вид:

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 + \epsilon^T D^T, \quad (1-23)$$

где a — угловой коэффициент характеристики $D_1 = f(N_3)$ всей установки (по линии *АД* — при $D^T = 0$);

$\epsilon^T = \frac{a}{a^{ч. н. д.}}$ — коэффициент ценности пара регулируемого отбора (с учетом регенерации) или коэффициент замещения 1 кг пара отбора D^T свежим паром D_1 при неизменной мощности N_3 ;

$a^{ч. н. д.}$ — угловой коэффициент характеристики $D_1 = f(N_3)$ ч. н. д.

Выражение для ϵ^T получается следующим образом. При отборе D^T мощность ч. н. д. сокращается на величину

$$N^T = \frac{D^T}{a^{ч. н. д.}};$$

для сохранения мощности установки N_3 неизменной нужно добавить определенное количество свежего пара («сквозного» потока):

$$\Delta D_1 = aN^T = \frac{a}{a^{ч. н. д.}} D^T = \epsilon^T D^T.$$

Величина a может быть выражена через угловые коэффициенты характеристик $D_1 = f(N_3)$ ч. в. д. и ч. н. д., как это показано ниже, где расход на холостой ход из рассмотрения исключается и $D_T = 0$.

Из характеристик ч. в. д. и ч. н. д. имеем:

$$N^{ч. в. д.} = \frac{D_1^{ч. в. д.}}{a^{ч. в. д.}}, \quad N^{ч. н. д.} = \frac{D_1^{ч. н. д.}}{a^{ч. н. д.}},$$

причем

$$D_1^{ч. в. д.} \approx D_1, \text{ а } D_1^{ч. н. д.} = (1 - x_p^{ч. в. д.}) D_1,$$

где $x_p^{ч. в. д.}$ — расход пара из регенеративных отборов ч. в. д. в долях от расхода пара на входе в ч. в. д. или от расхода свежего пара ($D_p^{ч. в. д.}/D_1$).

В результате подстановки получаем:

$$a = \frac{D_1}{N_3} = D_1 \cdot \left[\frac{D_1}{a^{ч. в. д.}} + \frac{(1 - x_p^{ч. в. д.}) D_1}{a^{ч. н. д.}} \right] \eta_{эм},$$

откуда

$$a = \frac{a^{ч. в. д.} a^{ч. н. д.}}{\left[(1 - x_p^{ч. в. д.}) a^{ч. в. д.} + a^{ч. н. д.} \right] \eta_{эм}}.$$

При значительных изломах линий на диаграмме режимов аналитическое выражение величины a усложняется.

г) Характеристика $D_1 = f(N_3; D_{п.}; D_T)$ установок типов К и П с двумя регулируемыми отборами пара

Проточная часть турбины с двумя регулируемыми отборами пара состоит из трех последовательных по ходу пара отдельных проточных частей:

1) части высокого давления (ч. в. д.) — от паровпуска до камеры первого — промышленного отбора пара;

2) части среднего давления (ч. с. д.) — между камерой первого промышленного отбора и камерой второго — коммунального или теплофикационного отбора пара;

3) части низкого давления (ч. н. д.) — между камерой второго — теплофикационного отбора и выхлопом.

Как и в турбине с одним регулируемым отбором, характер теплового процесса в каждой части зависит от ее системы парораспределения и от режима нагрузки установки.

Расход пара в ч. в. д. (исключая расход на регенерацию) равен сумме расходов в промышленный отбор и в ч. с. д.

Расход пара в ч. с. д. (исключая расход на регенерацию) равен расходу пара в теплофикационный отбор и в ч. н. д.

Расход пара регулируемых отборов определяется его потреблением, а в ч. н. д. с выхлопом в конденсатор — необходимой электрической мощностью всей установки, равной сумме внутренней мощности ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д., за вычетом электромеханических потерь установки.

Постоянные давления в камерах отборов поддерживаются двумя регуляторами давления промышленного и теплофикационного отборов. Каждый регулятор давления воздействует на парораспределение всех частей турбины.

С увеличением расхода в данный отбор его регулятор сокращает расход пара в последующую проточную часть и увеличивает расход в предыдущую, повышая расход свежего пара (например в турбине типа ВПТ-25).

С момента полного открытия парораспределения ч. с. д. или ч. н. д. действие соответствующего регулятора прекращается. Дальнейшее увеличение расхода пара через ч. с. д. или ч. н. д. происходит при «естественном» повышении давления в камерах отбора перед ними (сверх того, на которое установлен регулятор, если оно ниже допустимого предела).

Пропускная способность каждой проточной части определяется допустимым максимальным давлением и температурой пара на входе при полном открытии парораспределения.

Температура пара в камерах отборов непостоянна. Она повышается с уменьшением расхода пара в предыдущие проточные части, а также при «естественном» повышении давления в данной камере отбора (см. стр. 69).

При полном (минимальном) закрытии парораспределения ч. с. д. и ч. н. д. обеспечивается необходимый пропуск пара для их охлаждения при минимально допустимом давлении в камерах регулируемых отборов. Величина этого пропуска возрастает с повышением давления и понижением температуры пара в камерах отборов.

Физически возможный расход пара регулируемых отборов в каждом случае определяется как разность расходов пара на выходе из предыдущей проточной части и на входе в последующую часть турбины (исключая расход на регенерацию).

При значительных расходах пара через ч. в. д. и ч. с. д. и соответственно большой развиваемой ими мощности расход пара в ч. н. д. ограничивается допустимой предельной нагрузкой генератора.

Мощность, развиваемая турбиной, может быть значительно выше номинальной. Например, турбина типа ВТП-25 при отключенном теплофикационном отборе может развить мощность около 40 *Мвт* при допустимой нагрузке генератора 30 *Мвт*. Однако допускать перегрузку установки сверх номинальной мощности можно только с разрешения заводов-изготовителей генератора и турбины.

Режимы нагрузки установки, кроме максимально допустимой электрической нагрузки — по проектным данным генератора, ограничиваются и максимальными значениями следующих расходов пара по проектным данным турбины:

- а) расхода свежего пара и расхода пара в ч. н. д.;
- б) расхода пара промышленного отбора, ограниченного расходом свежего пара, минимальным пропуском пара в ч. с. д. и регенеративным отбором из ч. в. д.;
- в) расхода пара на входе в ч. с. д. или ее пропускной способности при полном открытии парораспределения ч. с. д. и допустимом максимальном давлении в камере промышленного отбора;
- г) расхода пара теплофикационного отбора, ограниченного пропускной способностью ч. с. д., минимальным пропуском пара в ч. н. д. и регенеративными отборами из ч. с. д. и на выходе из ч. с. д.

Следует заметить, что максимально допустимое давление (2,5 *ата*) в камере теплофикационного отбора турбины типа ВПТ-25 (а также ВТ-25) разрешается при неполном открытии парораспределения (поворотной диафрагмы) ч. н. д. Оно является недопустимым или практически невозможным (для ВПТ-25) при полном его открытии, так как в этом случае максимально допустимый расход пара в ч. н. д. (100 *т/ч*) достигается при более низком давлении (1,8 *ата*), а в турбине ВПТ-25 этот расход близок к пропускной способности ч. с. д.

Все режимы нагрузки турбины с двумя регулируемым отборами пара и соответствующие им характеристики $D_1 = f(N_g; D_n; D_r)$ установки можно свести к следующим шести видам, из которых первые четыре характерны для рассмотренной выше турбины с одним регулируемым отбором пара.

1. Режим промышленного отбора с включенным регулятором давления

Этот режим характеризуется расходом в промышленный отбор (при заданном давлении) всего пара, выходящего из ч. в. д., за вычетом некоторых расходов пара на подогреватели системы регенерации и на охлаждение всех проточных частей турбины после камеры отбора.

2. Конденсационный режим при включенных регуляторах давления пара промышленного и теплофикационного отборов, т. е. при заданных давлениях пара в камерах регулируемых отборов и при отсутствии отборов пара из этих камер на производство и теплофикацию.

3. Конденсационный режим с выключенными регуляторами давления отбираемого пара. При этом режиме органы парораспределения ч. с. д. и ч. н. д. постоянно полностью открыты, а отборы пара на производство и теплофикацию отсутствуют. Линия этого режима не показана на диаграмме режимов (см. стр. 70), но может быть на ней нанесена дополнительно.

4. Режим с промышленным отбором пара и конденсацией с включенными регуляторами давления при отсутствии теплофикационного отбора.

Для перечисленных режимов сохраняет силу все сказанное выше в отношении турбины с одним регулируемым отбором (см. стр. 68), с той лишь разницей, что в режимах 1 и 4 ч. н. д. заменяет проточная часть, состоящая из ч. с. д. и ч. н. д., мощность которой находится как сумма мощностей обеих частей по их отдельным характеристикам $N = f(D_1)$ в зависимости от расхода пара через каждую проточную часть. Все характеристики учитывают реальные условия процесса, о чем подробнее изложено в § 5-5.

5. Теплофикационный режим без конденсации с включенными регуляторами давления. Это режим с частичным промышленным отбором пара и отбором всего пара после ч. с. д. для теплофикации, включая минимальный пропуск пара в ч. н. д. и на регенерацию.

6. Режим с промышленным и теплофикационным отборами пара и с конденсацией.

Для режимов 5 и 6 служит та же характеристика, что и для режима 4, но с добавлением новой, второй диаграммы, располагаемой снизу. По ней определяется действительная мощность установки с учетом отвода части пара в теплофикационный отбор вместо ч. н. д., т. е. с соответствующим уменьшением мощности ч. н. д. и всей установки против их величины по верхней части диаграммы, построенной для режима с нулевым теплофикационным отбором пара.

Описанная ниже диаграмма режимов турбины с двумя отборами предложена впервые на ЛМЗ [Л. 10], она отличается наглядностью и удобством пользования. Основная идея построения диаграммы заключается в том, что турбина с двумя регулируемыми отборами первоначально рассматривается как турбина с одним промышленным (первым по ходу пара) регулируемым отбором пара. При этом весь пар после ч. с. д. условно принимается направленным в часть низкого давления турбины.

Диаграмма режимов подобной «одноотборной» турбины (без теплофикационного отбора) является составной частью диаграммы режимов турбины с двумя регулируемыми отборами и располагается в верхней ее части. Нижняя же часть диаграммы определяет поправку к мощности, вызванную наличием второго теплофикационного отбора. При построении нижней части диаграммы делается лишь одно упрощающее допущение о прямолинейности характеристики $N = f(D)$ ч. н. д., т. е. зависимости мощности ч. н. д. от расхода пара. Связанная с этим неточность нижней части диаграммы режимов устраняется специальной поправкой, вводимой наряду с некоторыми другими поправками на неучтенные диаграммой особенности теплового процесса установки: непостоянство теплосодержания пара в камере теплофикационного отбора и «естественное» повышение давления в ней при соответствующих повышенных расходах пара в ч. н. д. (наиболее значительная по величине поправка).

На основе диаграммы режимов по расходу пара представляется возможным построить необходимую в эксплуатации диаграмму режимов по расходу тепла, изображающую взаимную зависимость величин мощности, расхода тепла на установку и стпуска тепла паром промышленного и теплофикационного отборов: N_3 , Q_1 , $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{т}}$.

Аналитическое же выражение тепловой диаграммы наглядно отражает энергетическую сущность комбинированной выработки электрической и тепловой энергии.

О методе построения диаграмм режимов и поправочных кривых к ним см. § 5-5.

Характеристика $D_1 = f(N_3; D_{\text{п}}; D_{\text{т}})$ или диаграмма режимов турбины с двумя регулируемыми отборами

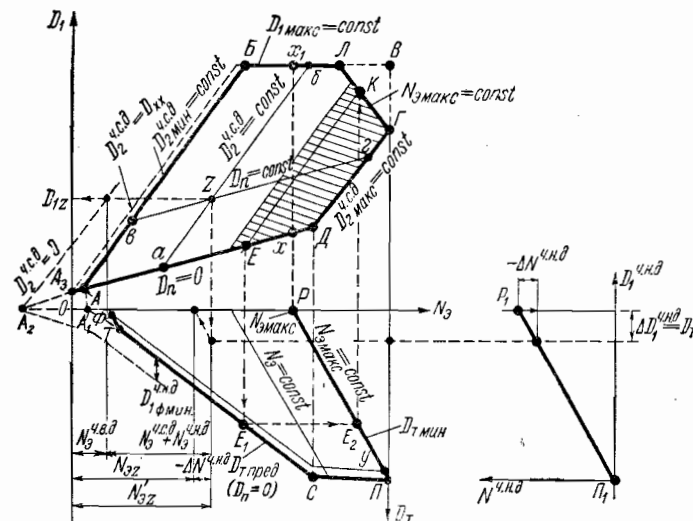


Рис. 1-41. Диаграмма режимов по расходу свежего пара $D_1 = f(N_3; D_{\text{п}}; D_{\text{т}})$ для установки с двумя регулируемыми отборами пара (заштрихована зона «естественного» повышения давления в камере промышленного отбора).

представлена в общих чертах на рис. 1-41. На верхней части диаграммы режимов линия AB относится к режиму с минимальным расходом пара на выходе из ч. с. д. (что связано с известными удобствами при построении диаграммы и пользовании ею — см. § 5-5) и в основном отражает характеристику $D_1 = f(N)$ ч. в. д.; линия AD относится к режиму без регулируемых отборов пара ($D_{\text{п}} = 0$; $D_{\text{т}} = 0$).

Остальные линии, приблизительно параллельные линиям AB или AD , соответствуют различным постоянным значениям расхода пара из первого регулируемого отбора или на выходе из ч. с. д.

В нижней части диаграммы линия PP представляет зеркальное изображение спрямленной характеристики ч. н. д.:

$$D_1^{ч. н. д.} = a^{ч. н. д.} N^{ч. н. д.}$$

Другие линии $N_9 = \text{const}$ в нижней части диаграммы, параллельные PP , проведены через деления шкалы N_9 для облегчения пользования диаграммой.

Влияние второго отбора пара отражается в нижней части диаграммы как уменьшение мощности установки из-за второго отбора, т. е. из-за сокращения расхода пара через ч. н. д. на $\Delta D_1^{ч. н. д.} = D_T$.

На рис. 1-41 линия PP для ясности показана отдельно и вынесена вправо — см. линию P_1P_1 .

Таким образом, мощность на зажимах генератора равна:

$$N_9 = N'_9 - \Delta N^{ч. н. д.},$$

где N'_9 — мощность установки по верхней части диаграммы режимов при заданных значениях D_1 и D_{II} ($D_T = 0$);

$\Delta N^{ч. н. д.} = \frac{D_T}{a^{ч. н. д.}}$ — получаемое на нижней части диаграммы уменьшение мощности установки за счет второго регулируемого отбора пара D_T — см. пункт из точки Z на рис. 1-41.

Диаграмма режимов по расходу пара имеет следующие граничные линии и точки:

1) Линии AB , BB , BG , $ГД$, AD и точки B , B , $Г$ и $Д$, аналогичны одноименным линиям и точкам на диаграмме режимов для установки с одним регулируемым отбором пара — см. стр. 72, с той лишь разницей, что вместо расходов пара через ч. н. д. здесь указаны расходы пара на выходе из ч. с. д. (линии AB и $ГД$), а линия AD отвечает нулевому расходу из обоих регулируемых отборов пара. Заштрихована зона режимов нагрузки при полностью открытом парораспределении ч. с. д. и переменном давлении в камере первого (промышленного) регулируемого отбора пара.

2) xx_1 — линия максимальной мощности установки при нулевом расходе пара из второго (теплофикационного) регулируемого отбора пара: $N_{\text{эмакс}}$ при $D_T = 0$.

3) PP — линия допустимого уменьшения теплофикационного отбора (ограничения расхода в ч. н. д.) при мощности установки, равной максимальной. Линия проведена через точку P максимальной мощности с угловым коэффициентом $a^{ч. н. д.}$ к оси N_9 .

4) $ТСП$ — линия ограничения теплофикационного отбора по расходу пара на выходе из ч. с. д. и минимальному пропуску пара в ч. н. д.: при нулевом промышленном отборе — линия $ТС$; при предельном давлении в камере этого отбора, т. е. при максимальном расходе пара в ч. с. д., — линия $ПС$ с окончанием в точке $П$ пересечения с линией PP .

Линия $ТСП$ проведена по ординатам $D_{T\text{пред}} = D_2^{ч. с. д.} - D_{1\text{мин}}^{ч. н. д.}$ (за вычетом также расхода пара перед ч. н. д. на регенерацию), отложенным на вертикалях, проходящих через точки пересечения соответствующих линий $D_2^{ч. с. д.} = \text{const}$ с линией AD на верхней части диаграммы режимов (см. пункт EE_1 на рис. 1-41). На этих вертикалях данное значение $D_2^{ч. с. д.}$ и, следовательно, $D_{T\text{пред}} = D_2^{ч. с. д.} - D_{1\text{мин}}^{ч. н. д.}$ являются наибольшими. На нижней части диаграммы можно провести горизонтальные линии предельных значений $D_{T\text{пред}}$, отвечающие различным постоянным значениям $D_2^{ч. с. д.}$. Каждой линии $D_2^{ч. с. д.} = \text{const}$ (например EK) отвечает своя горизонтальная линия предельного значения $D_{T\text{пред}}$ (E_1E_2) в нижней части диаграммы.

Заметим, что линии AB отвечают в нижней части диаграммы предельные значения $D_{\text{пред}}$, равные нулю (поскольку $D_2^{ч. с. д.} \approx D_{1\text{фмин}}^{ч. н. д.}$) — см. точку A_1 . Кроме того, обратим внимание на положение точки A пересечения линий $D_2^{ч. с. д.} = \text{const}$ и $D_{II} = 0$. На рис. 1-41 точка A не лежит на оси D_1 (при $N_9 = 0$).

При холостом ходе турбины ($N_9 = 0$) и $D_{II} = 0$ расход пара на выходе из ч. с. д. может быть больше или меньше (обычно меньше), чем $D_2^{ч. с. д.}$, и тогда линия $D_2^{ч. с. д.} = \text{const}$ соответственно пересекает ось D_1 выше, чем линия $D_{II} = 0$, или пересекает линию $D_{II} = 0$ при $N_9 > 0$, не достигая оси D_1 , например в точке A . При $D_{II} = 0$ вблизи холостого хода $D_2^{ч. с. д.} \approx D_1$ (см. точки A_2 и A_3).

Линии $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ ($E_1 E_2$) на нижней части диаграммы заменяют линиями $D_{II} = \text{const}$, каждую из которых строят по точкам пересечения соответственной линии $D_{II} = \text{const}$ с линиями $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ на верхней части диа-

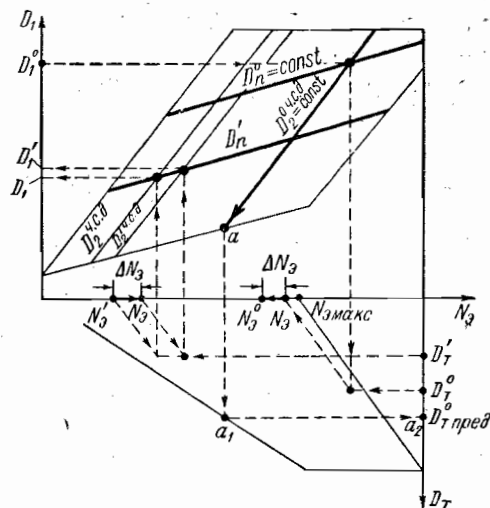


Рис. 1-42. Пример пользования диаграммой режимов турбины с двумя регулируемыми отборами.

граммы, снося эти точки по вертикали вниз на линию таких же значений $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ (см. рис. 5-12).

Предельное значение теплофикационного отбора можно определить и непосредственно из выражения

$$D_{T \text{ пред}} = D_2^{ч.с.д} - D_{I \text{ фин}}^{ч.н.д.},$$

где значение $D_{I \text{ фин}}^{ч.н.д.}$, найденное опытным путем, указывают на диаграмме режимов соответственно принятому значению $p_{\text{тх}}$, а $D_2^{ч.с.д}$ — находят на верхней части диаграммы по заданным величинам N_3 , D_T и D_{II} (см. § 5-6).

5) ΦU — то же, что и линия $TСП$, но при наибольшем давлении в камере теплофикационного отбора пара (когда регулятор установлен на это давление); $D_{T \text{ пред}}$ меньше, чем по линии $TСП$, вследствие большего пропуса пара в ч. н. д. Регулируемый отбор включают при электрической нагрузке выше 20% ее номинального значения.

Этому условию отвечает на нижней диаграмме граничная линия, на которой отложен отрезок ΦT .

6) $ЛГ$ — линия ограничения расхода свежего пара при данных значениях D_{II} и при $D_{T \text{ пред}}$ или $D_{I \text{ мин}}^{ч.н.д.}$. В этом случае сумма мощностей ч. в. д., ч. с. д. и минимальной мощности ч. н. д. достигает значения максимальной мощности установки (см. построение точки K по пунктиру $EE_1 E_2 K$ на рис. 1-41).

Уменьшению $D_2^{ч.с.д}$ на 10 м/ч (на величину интервала между линиями $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$) по линиям $АД$ и $ЛГ$ в верхней части диаграммы отвечает такое же уменьшение D_T на 10 м/ч соответственно по линиям $ТС$ и $ПР$ в нижней части диаграммы; естественно, что это облегчает построение линии $ЛГ$ в направлении от точки $Г$ к точке $Л$.

В заключение рассмотрим два примера пользования диаграммой режимов для турбины с двумя регулируемыми отборами (рис. 1-42).

Пример 1. Задано: расход свежего пара D_1^0 ; промышленный отбор D_{II}^0 ; теплофикационный отбор D_T^0 .

Находим по диаграмме режимов:

а) расход пара на выходе из ч. с. д. $D_2^{0ч.с.д.}$;

б) мощность на зажимах генератора N_3 .

Режим реально возможен, так как по нижней части диаграммы $D_T^0 < D_{T \text{ пред}}^0$ (см. пункт $aa_1 a_2$) и $N_3 < N_{3 \text{ макс}}$.

Поправка к мощности по рис. $-\Delta N_3$ (см. стр. 285).

Действительная мощность равна:

$$N_3^0 = N_3 - \Delta N_3.$$

Пример 2. Задано: мощность на зажимах генератора N_3' ; промышленный отбор D_{II}' ; теплофикационный отбор D_T' .

Находим предварительно по диаграмме режимов:

а) расход свежего пара D_1' ;

б) расход пара на выходе из ч. с. д. $D_2^{ч.с.д.}$.

Поправка к мощности по рис. $+\Delta N_3$.

Соответствующая мощность по диаграмме режимов равна:

$$N_3 = N_3' + \Delta N_3.$$

Окончательно расход свежего пара по диаграмме режимов при значениях D_{II}' , D_T' и N_3 равен D_1' .

При большой величине поправки ΔN_3 можно для уточнения D_1' повторить определение ΔN_3 , N_3 и D_1' , исходя из нового значения $D_2^{ч.с.д.}$ (по диаграмме), по методу последовательного приближения.

Аналитическое выражение характеристики $D_1 = f(N_3; D_n; D_t)$ или диаграммы режимов для турбины с двумя регулируемым отборами получается следующим образом. По верхней части диаграммы, как для турбины с одним регулируемым отбором пара, при $D_t = 0$ [см. выражение (1-23)]

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 + \varepsilon_n D_n.$$

По верхней же части диаграммы режимов при $D_t \neq 0$ мощность установки равна:

$$N'_3 = N_3 + \Delta N^{\text{ч. н. д.}},$$

где N'_3 и $\Delta N^{\text{ч. н. д.}}$ — см. выше.

Следовательно,

$$D_1 = D_{xx} + a(N_3 + \Delta N^{\text{ч. н. д.}}) + \varepsilon_n D_n,$$

или окончательно

$$D_1 = D_{xx} + aN_3 + \varepsilon_n D_n + \varepsilon_t D_t, \quad (1-24)$$

где $D_{xx} + aN_3$ — характеристика установки при $D_n = 0$ и $D_t = 0$ (линия АД);

$$\varepsilon_n = \psi' \left(1 - \frac{a}{a^{\text{ч. в. д.}}} \right) \text{ — коэффициент замещения пара}$$

промышленного отбора свежим паром (кг/кг) — см. ниже;

$a^{\text{ч. в. д.}}$ — угловой коэффициент характеристики $D_1 = f(N_3)$ ч. в. д. (линии АВ);

ψ' — коэффициент регенеративного отбора пара из ч. в. д. — см. ниже;

$$\varepsilon_t = \frac{a \Delta N^{\text{ч. н. д.}}}{D_t} = \frac{a}{a^{\text{ч. н. д.}}} \text{ — коэффициент замещения пара}$$

теплофикационного отбора свежим паром (кг/кг);

$a^{\text{ч. н. д.}}$ — угловой коэффициент характеристики $D_1 = f(N_3)$ ч. н. д. (линии ПР);

a — угловой коэффициент характеристики по линии АД.

Приведенное выражение для ε_n получено следующим образом: удельный прирост внутренней мощности ч. в. д. на 1 т пара на входе в ч. в. д. или приблизительно на 1 т

свежего пара равен $1/a^{\text{ч. в. д.}}$; удельный прирост внутренней мощности всей установки на 1 т свежего пара составляет $1/a$; уменьшение прироста мощности на 1 т пара промышленного отбора на выходе из ч. в. д. равно:

$$\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a^{\text{ч. в. д.}}} \right) \psi',$$

где

$$\psi' = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\text{ч. в. д.}},$$

т. е. отношению расхода пара на входе в ч. в. д. к расходу на выходе. Отсюда коэффициент замещения

$$\varepsilon_n = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a^{\text{ч. в. д.}}} \right) \psi' : \frac{1}{a} = \psi' \left(1 - \frac{a}{a^{\text{ч. в. д.}}} \right).$$

При отсутствии регенеративного отбора пара из ч. в. д. $\psi' = 1$.

Подробнее о расчете и построении диаграммы режимов по расходу пара для установки с одним и двумя регулируемым отборами пара см. § 5-5.

4. Часовой расход тепла на установку типа К

а) Характеристика $Q_1 = f(N_3)$ установки типа К без отборов пара

Расход тепла на установку $Q_1 = Q - Q_{\text{пв}}$ (см. § 1-4), а при расходе питательной воды, равном расходу свежего пара,

$$Q_1 = D_1 (i_1 - i_k),$$

где i_1 и i_k — теплосодержание свежего пара и конденсата после конденсатора.

При данных параметрах p_1, t_1, p_2 разность $i_1 - i_k = \text{const}$ и не зависит от системы парораспределения.

Из формул на стр. 62—63 для расхода пара получаем:

$$Q_1 = Q_{xx} + bN_3. \quad (1-25)$$

При изломах характеристики $D_1 = f(N_3)$

$$Q_1 = Q_{xx} + bN_3 + b_1(N_3 - N_{31}) + b_2(N_3 - N_{32}) + \dots + b_n(N_3 - N_{3n}), \quad (1-26)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{xx} &= D_{xx} (i_1 - i_k); \\ b &= a (i_1 - i_k); \\ b_1 &= a_1 (i_1 - i_k); \\ b_n &= a_n (i_1 - i_k). \end{aligned}$$

Характеристика $Q_1 = f(N_9)$ приведена на рис. 1-43.

б) Характеристика $Q_1 = f(N_9)$ установки типа К с регенеративными отборами пара

При $G_{\text{пит}} = D_1$ расход тепла на установку равен:

$$Q_1 = D_1 (i_1 - i_{\text{пит}}),$$

где величина теплоиспользования пара $(i_1 - i_{\text{пит}})$ возрастает с уменьшением паровой нагрузки, поскольку $i_1 =$

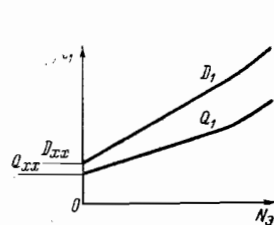


Рис. 1-43. Характеристика $Q_1 = f(N_9)$ установки типа К без отборов пара.

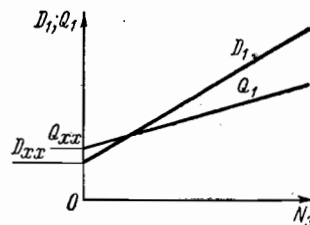


Рис. 1-44. Характеристика $Q_1 = f(N_9)$ установки типа К с регенеративными отборами пара.

$= \text{const}$, а $i_{\text{пит}}$ — уменьшается, что при спрямлении характеристики способствует увеличению условного расхода тепла на холостой ход.

Очевидно, что от характера линии $i_{\text{пит}} = f(N_9)$ зависит и форма характеристики $Q_1 = f(N_9)$; в результате ее условного спрямления величина Q_{xx} в Мккал/ч может оказаться меньше D_{xx} в т/ч (рис. 1-44).

Аналитическое выражение спрямленной характеристики $Q_1 = f(N_9)$ такое же, как для установки без отборов пара [см. выражения (1-25) и (1-26)], а величины b , $b_1, \dots, b_n$ меньше, ибо $i_1 - i_{\text{пит}}$ меньше $i_1 - i_k$.

(Для установки с промежуточным перегревом пара расход тепла на установку равен:

$$Q_1 = D_1 i_1 - D_1' i_1' + D_1'' i_1'' - G_{\text{пит}} i_{\text{пит}},$$

где $D_1' i_1'$ и $D_1'' i_1''$ — тепло в паре, отведенном от установки в промежуточный перегреватель, и в паре, подведенном обратно к установке для случая, когда $D_1' \neq D_1''$).

Зная удельный расход тепла q_1'' при номинальной мощности (или в точке первого излома характеристики), можно, пользуясь методом, изложенным на стр. 65—67, определить приблизительные значения величин Q_{xx} и b для выражения (1-25). При этом для режима с расходом свежего пара $0,4 D_1''$ теплосодержание питательной воды определяют по давлению пара в камере первого отбора, которое можно положить равным около 0,4 его значения при номинальном расходе D_1'' . Обычно теплоиспользование пара $\Delta i' = i_1 - i_{\text{пит}}$ при расходе пара $0,4 D_1''$ больше, чем при номинальном расходе D_1'' , примерно на 40 ккал/кг — для турбин серии В или приблизительно на 30 ккал/кг — для турбин среднего давления.

Таким образом, получаем:

$$b = \frac{D_1'' (\Delta i'' - 0,4 \Delta i')}{(1 - \delta N) N_9''} \eta_{\text{эм}}'' = \frac{\Delta i'' - 0,4 \Delta i'}{(1 - \delta N) \Delta i''} q_1'' \eta_{\text{эм}}'',$$

где $\Delta i''$ — теплоиспользование пара при номинальной мощности.

При $\Delta i' - \Delta i'' = 40$ ккал/кг

$$b = \frac{1 - 0,4 \frac{\Delta i'}{\Delta i''}}{1 - \delta N} q_1'' \eta_{\text{эм}}'';$$

при $\Delta i'' = 575$ ккал/кг

$$b \approx \frac{0,573}{1 - \delta N} q_1'' \eta_{\text{эм}}'';$$

$$x' = \frac{Q_{xx}}{Q_1''} = \frac{Q_1'' - b N_9''}{Q_1''} = 1 - \frac{b}{q_1''} = 1 - \frac{0,573}{1 - \delta N} \eta_{\text{эм}}''.$$

Для данных первой графы табл. 1-3, получаем:

$$x' = 1 - \frac{0,573}{1 - 0,36} \cdot 0,97 \approx 0,13, \text{ или } 13\%.$$

Расход тепла Q_1 при заданной мощности N_3 определяют по их номинальным значениям и найденной величине углового коэффициента характеристики b :

$$Q_1 = Q_1^n - b (N_3^n - N_3),$$

или

$$Q_1 = Q_1^n - b \left(1 - \frac{N_3}{N_3^n} \right).$$

в) Характеристика $Q_1 = f(N_3; Q^T)$ установки типа К с одним регулируемым отбором пара

Характеристика $Q_1 = f(N_3; Q^T)$ представляет собой диаграмму режимов по расходу тепла, подобную характеристике $D_1 = f(N_3; D^T)$ по расходу свежего пара. При $G_{\text{пит}} = D_1$ имеем $Q_1 = D_1 (i_1 - i_{\text{пит}})$.

Каждому значению D_1 отвечает определенное значение $i_{\text{пит}}$; поэтому при $i_1 = \text{const}$ у характеристики $D_1 = f(N_3; D^T)$ на шкале D_1 может быть нанесена вторая — неравномерная шкала для Q_1 ; значения Q_1 для повышенного или для наибольшего давления в камере отбора и соответственно повышенных значений

Рис. 1-45. Расход тепла на диаграмме режимов по расходу пара для установки типа К с одним регулируемым отбором пара.

$i_{\text{пит}}$ могут быть указаны в скобках дополнительно. Таким образом совмещаются характеристики $D_1 = f(N_3; D^T)$ и $Q_1 = f(N_3; D^T)$ — см. рис. 1-45.

Аналитическое же выражение зависимости расхода тепла на установку от электрической нагрузки и отпуска тепла паром регулируемого отбора, т. е. $Q_1 = f(N_3; Q^T)$, аналогично выражению (1-23) для расхода пара:

$$Q_1 = Q_{xx} + bN_3 + c^T Q^T, \quad (1-27)$$

где

$$Q_{xx} \approx D_{xx} (i_1 - i_{\text{пит}});$$

$$b = a (i_1 - i_{\text{пит}});$$

$$c^T = \varepsilon^T \frac{i_1 - i_{\text{пит}}}{i^T - i_K^T};$$

$$i^T - i_K^T = \frac{Q^T}{D^T}$$

$i_1 - i_{\text{пит}}$ — постоянный множитель из спрямленной характеристики $Q_1 = f(N_3; Q^T)$.

Характеристика $Q_1 = f(N_3; Q^T)$ показана на рис. 1-46.

Расход тепла на производство электроэнергии получается вычитанием из выражения (1-27) отпуска тепла Q^T :

$$Q_3 = Q_{xx} + bN_3 - (1 - c^T)Q^T,$$

или

$$Q_3 = Q_{xx} + bN_3 - \beta^T Q^T,$$

где $\beta^T = 1 - c^T$ — коэффициент уменьшения или экономии расхода тепла на установку (в долях от отпуска тепла паром отбора) за счет теплофикационной выработки электроэнергии N_3^T с удельным расходом тепла $860/\eta_{\text{эм}}$ [ккал/квт·ч] вместо конденсационной с дополнительным удельным расходом b [Л. 17].

Из полученного выражения легко найти значения удельной и полной теплофикационной выработки электроэнергии (с учетом регенеративных отборов), необходимые в практике планирования и нормирования технико-экономических показателей.

Разбивая выработку электроэнергии на две составляющие — конденсационную N_3^K и теплофикационную N_3^T

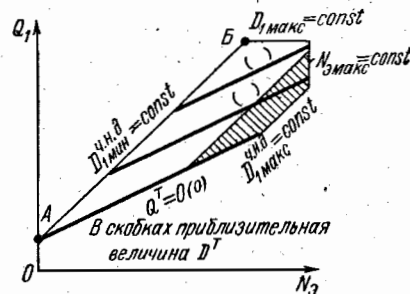


Рис. 1-46. Диаграмма режимов по расходу тепла $Q_1 = f(N_3; Q^T)$ для установки типа К с одним регулируемым отбором пара. В скобках — приблизительное значение величины D^T , отвечающее данному значению Q^T .

при условно одинаковом для них значении электро-механического к. п. д. $\eta_{эм}$ установки и используя равенства:

$$N_э = N_э^к + N_э^т,$$

$$Q_э = Q_э^к + Q_э^т = Q_{хх} + bN_э^к + \frac{860}{\eta_{эм}} N_э^т, \quad Q^т = \frac{N_э^т}{y_p^т},$$

получаем:

$$Q_э = Q_{хх} + b(N_э^к + N_э^т) - \frac{\beta^т N_э^т}{y_p^т},$$

или

$$Q_э = Q_{хх} + bN_э^к + \left(b - \frac{\beta^т}{y_p^т}\right) N_э^т;$$

следовательно,

$$b - \frac{\beta^т}{y_p^т} = \frac{860}{\eta_{эм}}; \quad y_p^т = \frac{\beta^т}{b - \frac{860}{\eta_{эм}}}; *$$

$$\beta^т = \left(b - \frac{860}{\eta_{эм}}\right) y_p^т,$$

т. е.

$$\beta^т = f(b; y_p^т).$$

Таким образом, исходное выражение можно представить в виде:

$$Q_э = Q_{хх} + bN_э - \left(b - \frac{860}{\eta_{эм}}\right) N_э^т.$$

г) Характеристика $Q_1 = f(N_э; Q_п; Q_т)$ установки типа К с двумя регулируемыми отборами пара

Как в установке с одним регулируемым отбором пара для любой нагрузки при $G_{пит} = D_1$, имеем:

$$Q_1 = D_1(i - i_{пит});$$

поэтому из выражения (1-24) получаем:

$$Q_1 = Q_{хх} + bN_э + c_пQ_п + c_тQ_т, \quad (1-28)$$

где

$$Q_{хх} = D_{хх}(i_1 - i_{пит}); \quad b = a(i_1 - i_{пит});$$

$$c_п = e_п \frac{i_1 - i_{пит}}{i_п - i_{пк}}; \quad c_т = e_т \frac{i_1 - i_{пит}}{i_т - i_{тк}}.$$

Графическое изображение характеристики $Q_1 = f(N_э; Q_п; Q_т)$ приведено на рис. 1-47.

* См. стр. 58 и сноску на стр. 93.

Выражения для расхода тепла на производство электроэнергии $Q_э$, а также удельной и полной теплофикационной выработки электроэнергии аналогичны приведенным выше (стр. 90) для установки с одним регулируемым отбором пара:

$$Q_э = Q_{хх} + bN_э - \beta_пQ_п - \beta_тQ_т,$$

где

$$\beta_п = 1 - c_п; \quad \beta_т = 1 - c_т;$$

$$y_{пп} = \frac{\beta_п}{b - \frac{860}{\eta_{эм}}} \text{ — для пара первого регулируемого отбора;}$$

$$y_{пт} = \frac{\beta_т}{b - \frac{860}{\eta_{эм}}} \text{ — для пара второго регулируемого отбора.}$$

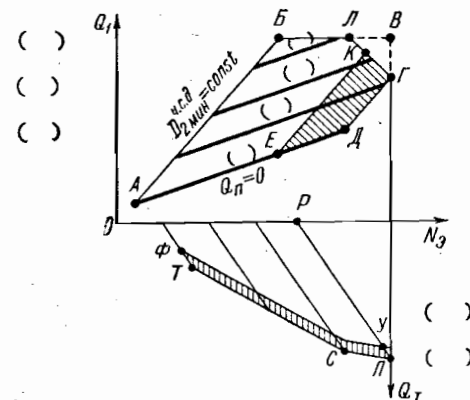


Рис. 1-47. Диаграмма режимов по расходу тепла $Q_1 = f(N_э; Q_п; Q_т)$ для установки типа К с двумя регулируемыми отборами пара. В скобках — приближительные значения величин $D_т$, $D_п$ и D_1 , отвечающие данным значениям $Q_т$, $Q_п$ и Q_1 .

Для установки в целом имеем:

$$N_э^т = y_{пп}Q_п + y_{пт}Q_т, \quad y_p^т = \frac{N_э^т}{Q_п + Q_т}.$$

Для турбины с двумя регулируемыми отборами пара применимы выражения, приведенные ранее для турбины с одним регулируемым отбором, например

$$Q_э = Q_{хх} + bN_э - \left(b - \frac{860}{\eta_{эм}}\right) N_э^т.$$

* См. сноску на стр. 93.

Заметим, что для аналитического выражения линии АБ на рис. 1-46 и 1-47 (при $D_1^{ч.п.д} \approx 0$ или $D_2^{ч.п.д} \approx 0$)

$$Q_1 = b' N_3$$

величина

$$b' = \frac{860}{\eta_{эм}} + \frac{1}{y_p}$$

поскольку

$$Q_1 = \frac{860}{\eta_{эм}} N_3^T + Q^T,$$

где

$$N_3^T = N_3; \quad Q^T = \frac{N_3^T}{y_p};$$

здесь y_p — для пара регулируемого отбора (первого в установке с двумя отборами).

5. Теплофикационная мощность установки типа П

а) Характеристика $N_3^T = f(Q^T)$ установки типа П без отборов пара

В данной установке расход отработавшего пара (включая протечку через уплотнения) равен расходу свежего пара, а отпуск тепла

$$Q^T \approx D_1 (i^T - i_k^T),$$

где $i^T - i_k^T$ — см. стр. 56.

Заменяя D_1 его выражением (1-18), где

$$D_1 = D_{xx} + a N_3^T,$$

получаем:

$$Q^T = Q_{xx}^T + a (i^T - i_k^T) N_3^T,$$

откуда

$$N_3^T = y^T (Q^T - Q_{xx}^T), \quad (1-29)$$

где

$$y^T = \frac{1}{a (i^T - i_k^T)}.$$

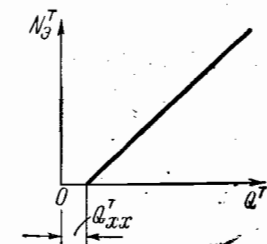


Рис. 1-48. Характеристика $N_3^T = f(Q^T)$ установки типа П без отборов пара.

Полагая величину $i^T - i_k^T$ при всех нагрузках неизменной, можно считать, что характеристика $N_3^T = f(Q^T)$

в обратном виде повторяет характеристику $D_1 = f(N_3)$ по выражениям (1-18) и (1-21).

Графическое изображение характеристики $N_3^T = f(Q^T)$ дано на рис. 1-48.

б) Характеристика $N_3^T = f(Q^T)$ установки типа П с регенеративными отборами пара

Как и для установки типа П без отборов пара (рис. 1-48), в данном случае характеристика $N_3^T = f(Q^T)$ в обратном виде повторяет характеристику $D_1 = f(N_3)$.

При наличии регенеративных отборов расход отработавшего пара ($D_2 = D^T$) меньше расхода свежего пара, т. е. $D^T < D_1$ или $D_1 = k D^T$.

В случае постоянного значения коэффициента k аналитическое выражение для расхода пара $D_1 = D_{xx} + a N_3^T$ можно путем умножения на $\frac{i^T - i_k^T}{k}$ и замены D_1 на $k D^T$ преобразовать в следующее выражение:

$$Q^T = Q_{xx}^T + \frac{a (i^T - i_k^T)}{k} N_3^T,$$

или [см. выражение (1-29)]

$$N_3^T = y^T (Q^T - Q_{xx}^T);$$

здесь

$$Q^T = D^T (i^T - i_k^T); \quad Q_{xx}^T = \frac{D_{xx}^T (i^T - i_k^T)}{k}; \quad y^T = \frac{k}{a (i^T - i_k^T)}.*$$

Непостоянство коэффициента k приводит к некоторому отклонению характеристики от полученного выражения.

в) Характеристика $N_3^T = f(Q^T; Q^{T0})$ установки типа П с одним регулируемым отбором пара

При отсутствии регенеративных отборов пара

$$D_1 \approx D_2 + D^{T0},$$

где D_2 — расход пара противодавления на выходе из турбины (включая протечку через уплотнения); D^{T0} — расход пара из регулируемого отбора.

* Здесь y^T , как и y^T , y_{pp} , y_{pt} на стр. 90—91, означает удельный прирост теплофикационной выработки электроэнергии.

Применяя аналитическое выражение (1-23) расхода свежего пара для установки с одним регулируемым отбором пара:

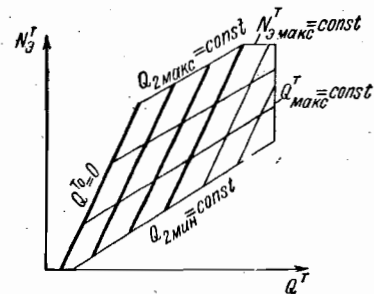


Рис. 1-49. Диаграмма режимов по мощности для установки типа П с одним регулируемым отбором пара.

$$D_1 = D_{xx} + aN_3^T + \varepsilon^0 D^{T0},$$

после замены D_1 на $D_2 + D^{T0}$ и расходов пара соответствующими величинами расхода тепла получаем:

$$aN_3^T = \frac{Q_2}{i_2 - i_{k2}} - \frac{Q_{xx}}{i_2 - i_{k2}} + \frac{(1 - \varepsilon^{T0}) Q^{T0}}{i^{T0} - i_k^{T0}},$$

или

$$N_3^T = y_2 (Q_2 - Q_{xx}) + y^{T0} Q^{T0},$$

где i_2 и i_{k2} — теплосодержание пара противодавления и его конденсата, возвращаемого от потребителя;

i^{T0} и i_k^{T0} — то же, для пара регулируемого отбора;

y_2 — удельная теплофикационная выработка электроэнергии для пара противодавления:

$$y_2 = \frac{1}{a(i_2 - i_{k2})} \text{ [квт} \cdot \text{ч/ккал]};$$

y^{T0} — то же, для пара регулируемого отбора:

$$y^{T0} = \frac{1 - \varepsilon^{T0}}{a(i^{T0} - i_k^{T0})} \text{ [квт} \cdot \text{ч/ккал]}.$$

Так как общий отпуск тепла Q^T от установки равен суммарному отпуску тепла паром отбора Q^{T0} и паром противодавления Q_2 , то, подставляя в последнее выражение $Q^T - Q^{T0}$ вместо Q_2 , после несложных преобразований получаем:

$$N_3^T = y_2 (Q^T - Q_{xx}) - (y_2 - y^{T0}) Q^{T0}. \quad (1-30)$$

Графическое изображение характеристики $N_3^T = f(Q^T; Q^{T0})$ приведено на рис. 1-49.

При наличии нерегулируемых отборов пара в зависимости от их нахождения в ч. в. д. или ч. н. д. в величины y_2 и y^T входит приближенный множитель k (см., например, выражение на стр. 93).

6. Часовой расход тепла на установку типа П

Расход тепла на выработку электроэнергии в установках типа П определяют из следующего выражения:

$$Q_3 = \frac{860 N_3^T}{\eta_{эм}}, \quad (1-31)$$

где $\eta_{эм}$ — см. стр. 245.

Полный расход тепла на установку типа П равен:

$$Q_1 = Q^T + Q_3. \quad (1-32)$$

В случае неиспользования тепла пара, отсасываемого из уплотнений, его следует включить в потери установки, и тогда

$$Q_3 = \frac{860 N_3^T}{\eta_{эм}} + D_{упл} \Delta i_{упл},$$

где $\Delta i_{упл}$ — разность теплосодержаний пара из уплотнений и его конденсата, возвращаемого в цикл установки, или восполняющей его добавки воды.

Анализ характеристик по удельному расходу тепла и удельной теплофикационной выработке электроэнергии не представляет интереса, поскольку они являются прямым результатом характеристик, рассмотренных ранее.

Все приведенные выше аналитические выражения являются приближенными, особенно в нерабочей зоне — вблизи холостого хода. Их получают путем условного спрямления характеристик, проведенных по опытным точкам. При спрямлении необходимо учитывать закономерность данной характеристики, допуская отклонения от опытных точек до 1%. При существенных изломах характеристики (обоснованных характеристикой парораспределения) аналитическое спрямление производят между точками изломов.

Пользуясь аналитическим выражением спрямленной характеристики, надо всегда помнить, что действительная характеристика, проведенная непосредственно по опытным близко расположенным точкам, отклоняется от прямой и что это может иметь существенное значение для выбора экономического режима нагрузки установки. Так, например, в зонах нагрузки при неполном открытии клапанов и особенно в начале их открытия следует считать экономичность установки пониженной независимо от прямолинейности ее характеристики.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

От правильности и точности измерений зависит правильность и точность результатов всего испытания.

Необходимая высокая точность результатов испытания, которая для современных крупных установок должна быть порядка $\pm 0,5\%$, предъявляет строгие требования в отношении класса точности измерительных устройств, их проверки и правильности применения. Поэтому при проведении теплового испытания паротурбинной установки должна быть полная уверенность в выполнении этих требований. Главные из них рассмотрены ниже применительно к наиболее употребительным видам измерений и устройств.

Величины, составляющие результат измерений, получают:

а) как среднеарифметическое значение мгновенных показаний прибора, записанных периодически или непрерывно во время опыта (давление, температура);

б) как частное от деления измеренного общего количества Q на период измерения Z :

$$A = \frac{Q}{Z},$$

где, например, A — мощность установки в киловаттах или расход воды в тоннах за час; Q — выработка электроэнергии в киловатт-часах по суммирующему счетчику или количество воды по баку (в тоннах) за период измерения Z (в часах);

в) косвенным путем, т. е. из таблиц или расчетом — по значениям измеренных других величин (удельный вес, теплосодержание пара и воды, расход по диафрагме).

Измерительное устройство обычно состоит из трех элементов:

1) приемника измеряемой величины (штуцер с отверстием — для давления, гильза — для температуры, диафрагма — для расхода, трансформаторы тока и напряжения — для мощности);

2) соединительных линий между приемником и измерительным прибором (трубки, провода, кабели);

3) измерительного прибора (манометр, потенциометр, дифференциальный манометр, ваттметр).

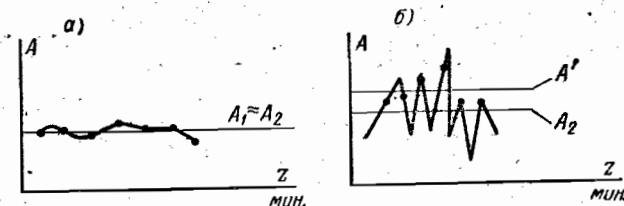


Рис. 2-1. Среднее значение по данным периодических измерений устойчивой и неустойчивой величин.

● — данные периодического измерения величины; A_1 — среднее значение устойчивой величины по данным периодических измерений; A' — среднее значение неустойчивой величины по данным периодических измерений; A_2 — действительное среднее значение величины.

Точное измерение обеспечивается тогда, когда выполнены следующие общие условия:

- измеряемая величина устойчива;
- приемник правильно отражает среднее для потока значение измеряемой величины в данный момент;
- соединительные линии быстро и точно передают импульс от приемника к измерительному прибору;
- измерительный прибор обладает малой инерцией, имеет требуемые класс точности (см. ниже) и пределы шкалы;

д) все ошибки измерения и отсчета изучены, причем для одних установлены необходимые поправки, а другие ничтожно малы.

Измерение резкопеременных величин, особенно при нечастой периодической записи, связано с увеличенными ошибками вследствие запаздывания показаний, неодновременности и большей неточности отсчетов, а также усреднения результата (рис. 2-1).

При интегральном (суммирующем) способе измерения эти ошибки меньше, а при измерении с помощью бака

расхода воды они отсутствуют, однако выделение, анализ и исключение отдельных участков опыта затруднительны и требуют, чтобы запись показаний велась через короткие промежутки — 5—10 мин.

Наряду с суммирующими предпочтительны точные самопишущие приборы, имеющие следующие достоинства:

1) непрерывная, наглядная, сосредоточенная и правильная (без субъективных ошибок) запись нескольких величин; при этом, однако, несколько нарушается одновременность записи;

2) отсутствие наблюдателей.

Одним из общих методов повышения точности измерения и отсчета показаний является применение многошкальных приборов или приборов с суженными пределами измерения, например потенциометра со шкалами 0—150° С, 150—300° С и 400—600° С, манометра со шкалой 100—120 ат.

Сосредоточение измерительных приборов облегчает сопоставление их показаний и выявление неисправностей, сокращает число наблюдателей, но увеличивает соединительные линии, чем осложняет монтаж и снижает надежность показаний приборов.

На соединительные линии и приборы не должны воздействовать: высокая и низкая температуры окружающей среды ($0 < t < 50^\circ \text{С}$), влага, вибрация, удары и другие механические усилия, вызывающие порчу устройств и дополнительные ошибки измерения.

В качестве нормальной для приборов принята температура 20° С, учитываемая в их паспорте, за исключением барометра; для которого температура принимается равной 0° С.

Стандартным значением ускорения силы тяжести принято считать его величину на широте 45° и на уровне моря (9,81 м/сек²).

Измерительные приборы до и после проведения испытания подвергают проверке и тарировке по эталону более высокого класса, о чем составляется протокол; эксплуатационные приборы (особенно самописцы), используемые для контроля и дублирования измерений, перед испытанием также проверяют.

Тарировка приборов является эффективным средством повышения точности измерения до уровня вариации прибора (см. ниже), не считая погрешности эталона.

До начала испытания рекомендуется проверить все измерительные устройства и убедиться в их правильном выполнении и исправном действии, установить необходимые поправки к показаниям приборов. Отступления, даже самые незначительные, должны быть устранены либо учтены руководителем испытания. Кроме того, все устройства должны отвечать требованиям прочности, безопасности и нормальной работы оборудования. Ртутные приборы следует заполнять очищенной ртутью с определенным удельным весом.

Описание принципа действия, конструкции и ремонта измерительных устройств см. [Л. 8, 18 и 20].

Приведем некоторые, употребляемые ниже метрологические определения (ГОСТ 3951-47), касающиеся измерительных приборов:

погрешность показаний прибора — разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины (знак + или —);

основная погрешность — погрешность при нормальных условиях работы прибора (знак ±);

дополнительная погрешность — погрешность, вызываемая отличием условий работы прибора от нормальных (знак + или —);

приведенная относительная погрешность — погрешность в процентах диапазона шкалы (знак + или —) — см. ниже;

допустимая погрешность — наибольшая погрешность прибора, допускаемая нормами (знак + или —);

поправка — величина, равная погрешности с обратным знаком, прибавляемая к показанию прибора (знак + или —);

вариация — наибольшая экспериментальная разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины и неизменных условиях работы (знак ±);

порог чувствительности — наименьшее значение измеряемой величины, вызывающее малейшее изменение показаний прибора (знак ±);

класс точности — число, равное величине допустимой основной приведенной относительной погрешности прибора в процентах:

$$S_{A_{\max}} = \frac{A - A_d}{A_{\max}} \cdot 100 [\%],$$

где A — показание прибора с погрешностью, равной допустимой, при нормальных для него условиях работы;

A_d — действительное значение измеряемой величины по эталонному, образцовому прибору;

$A_{\text{макс}}$ — диапазон шкалы;

а) верхнее значение односторонней (нуль слева) шкалы, или

б) сумма верхнего и нижнего значений двухсторонней (нуль посередине) шкалы, или

в) разность верхнего и нижнего значений (без нулевой шкалы).

2-2. ОБЪЕМ И ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Для получения тепловых характеристик установки необходимы измерения во время опытов следующих величин:

1) электрической мощности на зажимах генератора, тока и напряжения;

2) давлений, температур и расходов для всех потоков пара и воды на входе и выходе у каждого элемента установки;

3) уровня (количества) воды в емкостях — конденсаторе, подогревателях, баках;

4) механического перемещения органов регулирования и парораспределения;

5) числа оборотов турбины;

6) продолжительности опыта — величины первостепенной важности для суммирующего способа измерения.

Приложение 5-8 может служить наглядным пособием при составлении перечня измеряемых величин для испытания установки любого типа; при этом следует, конечно, исключить ненужные и включить дополнительно необходимые для данной установки величины с учетом ее тепловой схемы и местных особенностей.

Измерения основных величин, требующие наибольшей точности, надо обязательно дублировать, применяя не менее двух совершенно отдельных измерительных систем, в одной из которых измерительный прибор расположен вблизи и на уровне приемника для уменьшения искажений и поправок.

Основными являются величины, составляющие тепловую характеристику установок в целом: электриче-

ская мощность, давление, температура и расход потоков пара, подводимых к установке и отводимых от нее, расход и конечная температура питательной воды.

Точность измерения основных величин, включая погрешность отсчета показаний приборов [Л. 31, стр. 17], должна составлять:

Расход пара: свежего, отборов	0,2% от расхода свежего пара
Электрическая мощность	0,2%
Давление выше 0,20 ата	0,5%
ниже 0,2 »	0,2 мм рт. ст.
Барометрическое давление	0,2 » » »
Температура свежего и отборного пара	0,5° С
Температура охлаждающей воды	0,1° С
Температура конденсата	0,2° С
Время (для суммирующих приборов)	0,05% периода измерения
Перемещение элементов регулирова- ния	1% полного хода
Число оборотов турбины	0,2% номиналь- ной величины

Однако более реальными следует считать погрешности измерения расходов и мощности $\pm 0,5\%$, давлений ниже $0,2 \text{ ата} \pm 1 \text{ мм рт. ст.}$, а температуры свежего пара $\pm 1^\circ \text{С}$. Поэтому в ряде примеров и образцов форм, приводимых в книге, указана более низкая точность приборов, например ваттметры класса 0,5.

2-3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ СРЕДЫ

Устройство для измерения давления среды состоит из заборной трубки (заборного отверстия), соединительной трубки и манометра (рис. 2-2). Это устройство считают годным к применению, если его элементы удовлетворяют перечисленным ниже условиям.

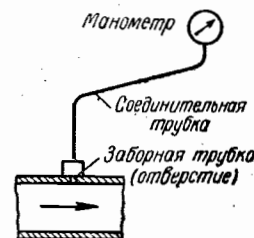


Рис. 2-2. Элементы устройства для измерения давления среды.

1. Заборная трубка

а) Заборная трубка установлена на прямолинейном одинакового сечения участке трубопровода любого наклона с заборным отверстием заподлицо с внутренней стенкой;

направление потока параллельно плоскости отверстия, а вблизи него отсутствуют источники отклонения изавихрения потока (рис. 2-3, а и б);

б) при малом давлении и большой скорости потока (в горловине конденсатора) приняты меры против его

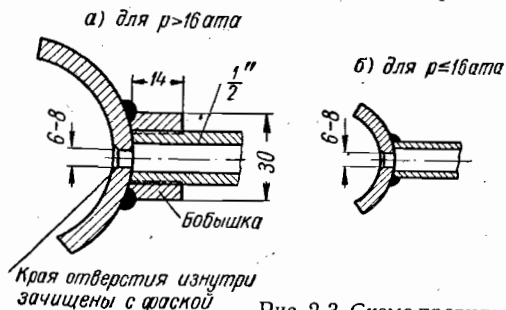
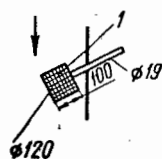


Рис. 2-3. Схема правильного устройства заборного отверстия для измерения давления.

в) для $p < 1 \text{ ата}$



1 — глухой конец трубки
 $\varnothing 19 \text{ мм}$ с отверстиями
 $\varnothing 1,5 \text{ мм}$, окруженный
 проволоочной сеткой
 $\varnothing 120 \text{ мм}$.

динамического действия (см. рис. 2-3, в и стр. 128); в большем сечении $F [\text{м}^2]$ потока число точек измерений $z = \frac{F}{2}$ (по две-три точки справа и слева от конденсатора).

2. Соединительная трубка

а) Материал трубки выбирается, исходя из следующих условий:

при $p > 50 \text{ ата}$ и $t > 250^\circ \text{C}$ — стальная (марки Ст. 3) бесшовная, после коренных вентилях;

при $p \leq 50 \text{ ата}$ и $t \leq 250^\circ \text{C}$ — красномедная отожженная;

при $p \leq 2,5 \text{ ата}$ и $t \leq 60^\circ \text{C}$ — резиновая, красномедная отожженная.

Материал прокладок для соединений при $p > 2,5 \text{ ата}$ — красная медь, паранит, клингерит;

б) диаметр и длина трубки:

$d \geq 3 \text{ мм}$ при $l \leq 20 \text{ м}$; $d \geq 6 \text{ мм}$ при $l \leq 50 \text{ м}$;

для горячей воды и при высоком давлении $l > 3 \text{ м}$;

в) трубка расположена по кратчайшей трассе, без изломов и сплющивания на поворотах, герметична и вся доступна для осмотра; на трубопроводах пара и горячей воды ($t > 100^\circ \text{C}$) перед манометром имеется гидрозатвор (если он не образуется в другом месте трубки) для защиты пружины манометра (рис. 2-4);

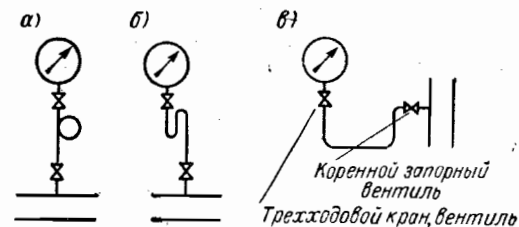


Рис. 2-4. Устройство гидрозатвора перед манометром.

г) при $p < 2 \text{ ата}$, во избежание образования водяных и воздушных пробок и для ослабления влияния неплотностей, диаметр трубки, заборного отверстия и коренного вентиля не меньше 8 мм; трубка имеет непрерывный уклон не менее 1 : 10 к точке забора;

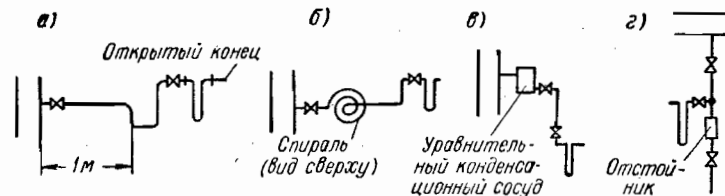


Рис. 2-5. Горизонтальный участок (а), спираль (б), уравнильный конденсационный сосуд (в), отстойник (г) перед ртутным манометром.

д) трубка к ртутному манометру на трубопроводах пара и горячей воды ($t > 75^\circ \text{C}$) имеет у места забора горизонтальный участок, спираль или достаточных размеров уравнильный конденсационный сосуд для сохранения высоты и температуры столба конденсата в трубке при его перемещении в манометре (рис. 2-5, а, б, в).

е) там, где из измеряемой среды выпадают осадки, — перед присоединением ртутного (стеклянного) манометра установлен отстойный сосуд (рис. 2-5, г);

ж) арматура: у заборной трубки установлен «коренной» запорный вентиль; у манометра — трехходовой вентиль (рис. 2-4 и 2-5). При давлении $p < 2 \text{ ата}$ вентиль у манометра заменяет трехходовой притертый стеклянный краник.

3. Манометр

А. Тип и класс применяемого манометра:

а) при давлении $p > 2 \text{ ата}$ — манометр с трубчатой пружиной класса 0,35 (образцовый) или 0,5 (лабораторный);

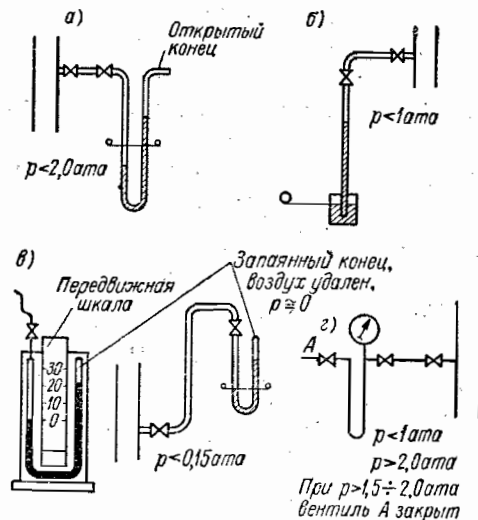


Рис. 2-6. Типы ртутных манометров.

б) при давлении $p < 2 \text{ ата}$ — двухстекольный U-образный или чашечный ртутный манометр (рис. 2-6, а и б), а также протарированный дифференциальный манометр (дифманометр) типа ДП с одним открытым концом, который при малой разности давлений (до 50 мм рт. ст.) может быть точнее стеклянного прибора, учитывая погрешность отсчета показаний;

в) при давлении $p < 0,15 \text{ ата}$ — то же, что в п. «б», или укороченный абсолютный манометр, показывающий абсолютное давление непосредственно в миллиметрах ртутного столба (рис. 2-6, в);

г) для пункта, где может быть давление $p < 1 \text{ ата}$ и $p > 2 \text{ ата}$: сочетание пружинного манометра и ртутного дифманометра с трехходовым вентилем (рис. 2-6, г); ртутный или пружинный манометр с расположением его ниже точки отбора настолько, чтобы обеспечить заполнение импульсной трубки водой и избыточное давление ($p > 1 \text{ ата}$) у штуцера манометра во всех случаях;

д) при барометрическом давлении — ртутный чашечный барометр и для контроля — aneroid.

Все манометры, исключая абсолютный (п. «в») и барометр, измеряют разность двух давлений — в точке забора и атмосферы.

Б. Условия применения пружинного манометра:

а) измеряемое давление больше $1/3$ и меньше $2/3$ верхнего значения шкалы;

б) наименьшее деление шкалы отвечает необходимой точности измерения;

в) манометр установлен вертикально ниппелем вниз (как при тарировке), хорошо закреплен; вблизи него установлен термометр;

г) стекло целое, чистое; шкала четкая, хорошо освещена; удобно расположена для отсчета;

д) имеются пломба, паспорт (непросроченный), протокол поверки (тарировки манометра) по форме приложения 3-10 с поправками в пределах класса;

е) тарировка произведена при постепенном повышении и понижении давления через пять-десять равных промежутков в рабочих для данного пункта измерения пределах, с легким постукиванием при отсчете, при такой же наружной температуре, как на пункте измерения (либо установлена температурная поправка); эталоном служил грузопоршневой манометр или прибор более высокого класса, чем поверяемый манометр, — см. также общие требования (§ 2-1).

В. Условия применения ртутного манометра:

а) положение манометра проверено по отвесу; при $p < 1 \text{ ата}$ манометр установлен на уровне или выше точки забора, при $p > 1 \text{ ата}$ — ниже точки забора или выше на H [м] при условии, что $p > H\gamma \cdot 10^{-4} \text{ кг/см}^2$, где γ — удельный вес среды в трубке, кг/м^3 ;

б) шкала миллиметровая, четкая, чистая, хорошо освещена, удобно расположена, имеет штамп государственной поверки, отвечает максимально возможному значению показаний; для барометрического давления и для давления в конденсаторе — шкала с нониусом;

в) стекла чистые (очищенная ртуть долго не дает амальгамы), одинакового сечения — у двухстекольного манометра, диаметром не менее 6 мм;

г) ртуть в стеклах без пузырьков воздуха, разрывов и грязи и нигде не протекает; над ртутью — слой воды (1—2 мм) для предотвращения испарения ртути;

д) у абсолютного манометра в запаянной ветви нет воздуха над ртутью;

е) при опускании уровня ртути величина мениска не изменяется (в стекле с жирной поверхностью возможно появление вогнутого мениска или его уменьшение);

ж) у манометра есть термометр для измерения температуры окружающей среды;

з) под ртутным манометром поставлен желоб или противень с водой для улавливания возможной утечки ртути; приняты меры против выбрасывания ртути из манометра в помещение (например на открытый конец надет резиновый шланг, опущенный в противень).

Г. Проверка исправности устройства для измерения давления:

а) после закрытия «коренного» вентиля давление по включенному манометру изменяется не более чем на 15% в минуту;

б) после сообщения с атмосферой через трехходовой вентиль показания манометра находятся на нуле;

в) на включенном манометре при открытых вентилях стрелка (ртуть) слегка перемещается («дышит»), показания согласуются с дублирующими и другими приборами (при резких колебаниях стрелки рекомендуется прикрывать трехходовой вентиль, не перекрывая его совсем); вентили надо открывать и закрывать весьма медленно, плавно, чтобы не повредить манометр;

г) соединительная трубка герметична, особенно при вакууме, имеет температуру окружающей среды; ее заполнение однородной средой — водой или воздухом — обеспечено путем периодической продувки;

д) у манометра имеется маркировочная бирка, проверенная по месту измерения давления,

Д. Поправки к показаниям манометра:

Действительное абсолютное давление среды p у заборного отверстия с учетом поправок при измерении *пружинным манометром* определяется из выражения

$$p = p_m + \Delta p_{\Pi} + \Delta p_t + \Delta p' + \Delta p_6 + \Delta p'_6 [ата],$$

где p_m — показание пружинного манометра, ата;

Δp_{Π} — поправка по паспорту или, вернее, по протоколу тарировки;

Δp_t — поправка на температуру окружающей среды;

$\Delta p'$ — поправка на высоту H' [м] центра манометра над заборным отверстием;

Δp_6 — поправка на наружное барометрическое давление;

$\Delta p'_6$ — поправка на высоту $\pm H'_6$ расположения барометра над центром манометра.

Поправка на температуру окружающей среды находится по выражению

$$\Delta p_t = p_m (t_m - t_T) k,$$

где t_m — температура манометра в момент измерения, °C;

t_T — то же, в момент тарировки, °C;

k — температурный коэффициент, различный даже для одинаковых манометров (неизвестен); может быть получен путем тарировки данного манометра при различной температуре t_m .

В среднем можно считать $k = 0,0005$, но он может быть в пределах 0—0,0013.

Ответственные манометры (например для измерения давления свежего пара) надо тарировать на рабочем месте; Δp_t может достигать $\pm 2\%$.

Поправку на высоту H' [м] центра манометра над заборным отверстием определяют по формуле

$$\Delta p' = \frac{H' \gamma}{10^4}.$$

где γ — удельный вес среды в соединительной трубке; для воды $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$; для воздуха $\gamma = 1,29 \text{ р кг/м}^3$, а $\Delta p' = 0$; для манометра, расположенного ниже точки измерения, H' имеет знак минус.

Поправку на наружное барометрическое давление Δp_6 находят по выражению

$$\Delta p_6 = B_0 : H_a \text{ [ата]},$$

где B_0 — показание барометра с учетом поправки по паспорту в мм рт. ст., приведенное к 0°C по рис. 2-7; барометрическое давление B_0 , отсчитанное по шкале в миллибарах, составляет в мм рт. ст.:

$$B = 0,750 B_0;$$

H_a — столб ртути при 0°C , соответствующий давлению 1 кг/см^2 для данной географической широты местности и высоты над уровнем моря по рис. 2-8.

Например, для Ленинграда $H_a = 734,6 \text{ мм рт. ст.}$, а для Харькова $H_a = 735,2 \text{ мм рт. ст.}$

Поправка на высоту $\pm H'_6$ расположения барометра над центром манометра (для пружинного манометра ничтожная) равна:

$$\Delta p'_6 = \frac{\gamma_{\text{возд}} H'_6}{10^4} \approx \frac{1,2 H'_6}{10^4};$$

при $H'_6 = 10 \text{ м}$

$$\Delta p'_6 = 0,0012 \text{ ата, или } \sim 1 \text{ мм рт. ст.}$$

Действительное абсолютное давление среды p у заборного отверстия с учетом поправок при измерении ртутным манометром определяется из выражения

$$p = \pm (H_m + \Delta H_t + \Delta H_k + \Delta H_v) : H_a + \Delta p' + \Delta p_6 + \Delta p'_6 \text{ [ата]},$$

где: знак плюс (+) перед скобкой при $p > 1 \text{ ата}$; знак минус (—) при $p < 1 \text{ ата}$;

H_m — показание ртутного манометра, мм рт. ст.;

ΔH_t — поправка для приведения температуры ртути к 0°C и температуры шкалы к 20°C — по рис. 2-7;

ΔH_k — поправка на капиллярность;

ΔH_v — поправка на столбики воды над ртутью в ветвях ртутного манометра.

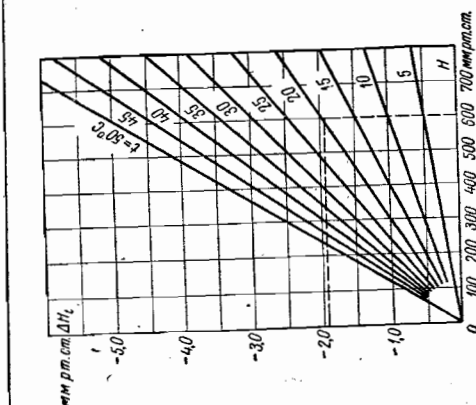


Рис. 2-7. Поправка для приведения показаний ртутного манометра и барометра к лагунной шкалой к 0°C . Для прибора со стальной шкалой поправку умножить на 1,03.
 $H = 600 \text{ мм рт. ст. (лагунная шкала);}$
 $t = 20^\circ \text{C; } \Delta H = -1,95 \text{ мм рт. ст.;}$
 $H_0 = 600 - 1,95 = 598 \text{ мм.}$

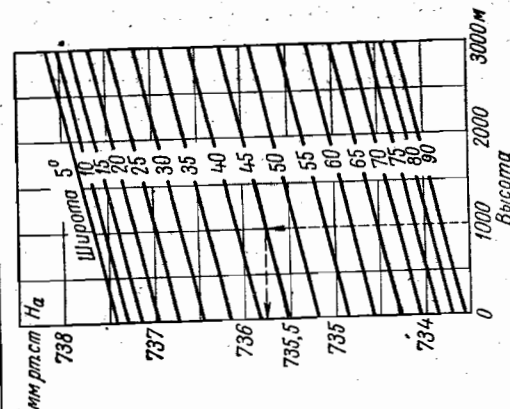


Рис. 2-8. График для определения высоты ртутного столба при 0°C соответствующей давлению 1 кг/см^2 (1 ата), в зависимости от географической широты и высоты над уровнем моря. Высота над уровнем моря — 1000 м; широта — 45° ; $H_a = 735,2 \text{ мм рт. ст.}$

Поправка ΔH_t получена из следующих выражений:
поправка на температуру ртути

$$\Delta H_t' = \frac{H_m}{1 + \beta t} - H_m = -H_m \frac{\beta t}{1 + \beta t};$$

поправка на температуру шкалы (обратная по знаку для столбика ртути)

$$\Delta H_t'' = H_m \alpha (t - 20).$$

Общая поправка к показанию манометра составит:

$$\Delta H_t = H_m \left[\alpha (t - 20) - \frac{\beta t}{1 + \beta t} \right] \approx H_m [\alpha (t - 20) - \beta t],$$

где α — коэффициент расширения шкалы:

для латуни — 0,000018;

для стекла — 0,000080;

для стали — 0,000011;

t — температура шкалы и ртути, °C;

β — объемный коэффициент расширения ртути — 0,000182;

20 — температура по паспорту шкалы, °C.

Поправка на капиллярность ΔH_k для двухстекольного манометра (при неодинаковых диаметрах стекол) и для одностекольного чашечного манометра — по табл. 2-1 [Л. 8]. Поправка зависит от внутреннего диаметра трубки и высоты мениска, на которую влияет чистота ртути и трубки.

Таблица 2-1

Внутренний диаметр трубки, мм	Высота мениска, мм							
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
4	0,83	1,22	1,54	1,98	2,37	—	—	—
5	0,47	0,65	0,86	1,19	1,45	1,80	—	—
6	0,27	0,41	0,56	0,78	0,98	1,21	1,43	—
7	0,18	0,28	0,40	0,53	0,67	0,82	0,97	1,13
8	—	0,20	0,29	0,38	0,46	0,56	0,65	0,77
9	—	0,15	0,21	0,28	0,33	0,40	0,46	0,52
10	—	—	0,15	0,20	0,25	0,29	0,33	0,37
11	—	—	0,10	0,14	0,18	0,21	0,24	0,27
12	—	—	0,07	0,10	0,13	0,15	0,18	0,19
13	—	—	0,04	0,07	0,10	0,12	0,13	0,14

Поправки на столбики воды над ртутью в ветвях ртутного манометра вычисляется по выражению

$$\Delta H_b = (h_b^a - h_b^u) : 13,6 \text{ [мм рт. ст.]},$$

где h_b^a и h_b^u — столбики воды в миллиметрах соответственно над верхним уровнем ртути со знаком (+) и над нижним со знаком (—) (рис. 2-9).

Если соединительная трубка ртутного манометра вся заполнена водой, поправку ΔH_b принимают равной высоте столбика воды в открытой ветви со знаком (+) или (—) в зависимости от уровня ртути в этой ветви.

Величины $\Delta p'$, Δp_6 , H_a и $\Delta p'_6$ — см. выше; для ртутного манометра величина H' — высота уровня ртути в манометре (в присоединенной ветви двухстекольного манометра) над заборным отверстием, зависящая от величины H_m .

Действительное давление по показаниям ртутного манометра определяют по форме, приведенной в табл. 2-2.

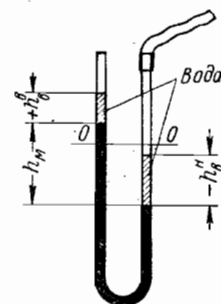


Рис. 2-9. Измерение давления ртутным манометром при наличии столбиков воды над ртутью.

Таблица 2-2

Обозначение величины	Номер опыта			Способ определения
	1	2	3	
H_m , мм рт. ст.				Среднее за опыт показание ртутного манометра
ΔH_t "				По рис. 2-7
ΔH_k "				По табл. 2-1
ΔH_b "				$(h_b^a - h_b^u) : 13,6$ или $\pm \Delta h_b$ в открытой ветви
$\Delta p'$, ата				$\frac{H' \gamma}{10\,000}$
Δp_6 "				$E_0 : H_a$ по рис. 2-7 и 2-8
$\Delta p'_6$ "				$\frac{1,2 H'_6}{10\,000}$
p "				$(H_m + \Delta H_t + \Delta H_k + \Delta H_b) : H_a + \Delta p' + \Delta p_6 + \Delta p'_6$

Для упрощения расчетов отдельными поправками пренебрегают, если это незначительно повышает ошибку конечного результата.

2-4. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ ДВУХ СРЕД

Устройство для измерения разности давлений двух сред состоит из двух заборных трубок (отверстий), двух соединительных трубок и дифференциального манометра (рис. 2-10, а и б).

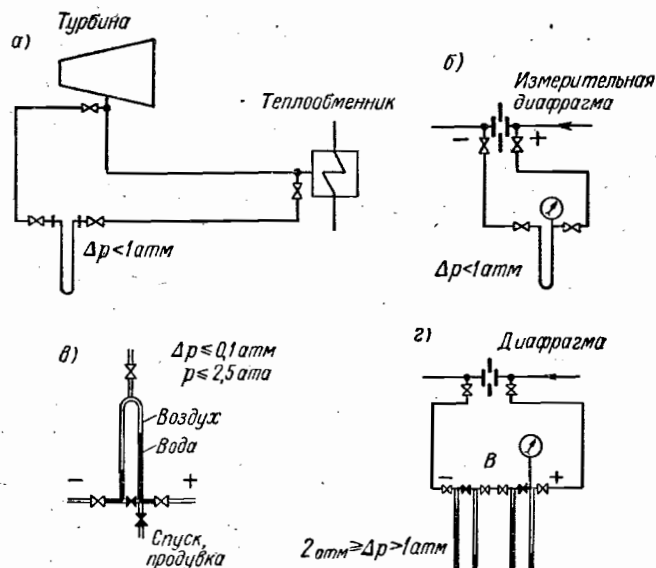


Рис. 2-10. Измерение разности давлений двух сред. Посредством обводных вентилей В на рис. г можно отключить один из дифманометров или изменить в нем перепад.

Устройство при его правильном выполнении должно удовлетворять условиям, перечисленным ниже.

1. Заборные и соединительные трубки

Соединительные трубки имеют непрерывный уклон не менее 1 : 10 и внутренний диаметр не менее 10 мм; остальные условия — см. § 2-3.

2. Дифференциальный манометр

В зависимости от величины измеряемой разности давлений Δp применяются следующие приборы:

а) при $\Delta p < 0,1 \text{ атм}$ — двухстекольный дифманометр с заполнением тяжелой жидкостью, не смешивающейся с водой, например дихлорэтаном, тетрабромэтаном [Л. 14], удельный вес которых должен быть проверен до заполнения прибора; при абсолютном давлении до 2 атм — дифманометр с воздушно-водяным заполнением (рис. 2-10, в);

б) при $\Delta p \leq 1 \text{ атм}$ и абсолютном давлении $p \leq 2,5 \text{ атм}$ двухстекольный дифманометр или манометр с ртутным заполнителем и протарированный самопишущий дифманометр типа ДП (в качестве дублера) со сменным стаканом минимальных размеров, пригодный и при более высоком абсолютном давлении;

в) при $1 < \Delta p < 2 \text{ атм}$ — два последовательно соединенных дифманометра (рис. 2-10, г);

г) при $\Delta p > 2 \text{ атм}$ — тензометрический дифманометр, мембранный дифманометр типа ДМ-6 или два образцовых пружинных манометра; разность их показаний определяется с учетом всех поправок;

д) при измерениях расхода пара (см. § 2-7) на плюсовой стороне у дифманометра устанавливается образцовый манометр; другие условия те же, что для ртутного манометра, — см. стр. 105.

3. Проверка исправности устройства для измерения разности давлений двух сред

Исправность устройства определяют по следующим признакам:

а) соединительные трубки совершенно герметичны, на всем протяжении имеют температуру окружающей среды; их заполнение однородной средой (водой) обеспечено путем периодической продувки; вентили открыты, а уравнильный вентиль у дифманометра плотно закрыт; после закрытия коренных вентилей показание включенного дифманометра изменяется медленно;

б) плюсовая и минусовая стороны ($\pm$) у точек забора и у дифманометра соответствуют друг другу;

в) у дифманометра есть термометр для измерения температуры ртути в стеклах, прозрачный защитный щиток

(при абсолютном давлении выше 5 *ата*), маркировочная бирка, проверенная по месту заборá;

г) внутренние диаметры стекол дифманометра отличаются незначительно, так что при максимальном перепаде давления столбики ртути не выходят за пределы стекол;

д) уровень ртути в дифманометре не убывает (за счет утечки или усадки ртути);

е) при отключении дифманометра с закрытым уравнительным вентилем перепад не уменьшается;

ж) в обоих стеклах ртуть находится на одном уровне ($\Delta p = 0$), близком к нулю шкалы:

при открытом уравнительном вентиле;

при сообщении обоих стекол с атмосферой;

при отсутствии разности давлений в точках забора (при расходе, равном нулю для диафрагмы);

з) показания дифманометра устойчивы, согласуются с показаниями дублирующих приборов и соответствуют ожидаемым значениям; ртуть в стеклах колеблется («дышит»).

Неодинаковые диаметры стекол (влияние капиллярности), различные температуры импульсных трубок, разные уровни расположения заборных отверстий, а также неоднородное заполнение импульсных трубок и стекол (пар, воздух, вода, грязь), неплотности в соединениях и неотвесное положение дифманометра — могут служить причиной искажений его показаний и иногда — даже появления обратного перепада.

4. Поправки к показаниям дифференциального манометра

Действительная разность давлений Δp с учетом поправки определяется из следующего выражения:

$$\Delta p = (H_m + \Delta H_t + \Delta H_k + \Delta H_v) : H_a + \Delta p' [ata],$$

где H_m — показание дифференциального манометра, мм рт. ст.;

ΔH_t ; ΔH_k ; ΔH_v ; $\Delta p'$ — поправки, указанные на стр. 107—108;

здесь $\Delta p'$ — разность величин $\Delta p'$ для плюсовой и минусовой ветвей при условии, что заборные отверстия расположены на разных уровнях.

При измерении расхода дроссельной диафрагмой поправка ΔH_k должна быть равна нулю, в чем легко убедиться при перепаде давления, равном нулю.

2-5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Устройство для измерения температуры среды состоит из термометрической гладкой закрытой гильзы с ртутным термометром или с термопарой, соединительными проводами и потенциометром. Применяются и термометры сопротивления, которые здесь не рассматриваются.

Точному измерению температуры часто мешают температурная неравномерность потока в месте измерения и разность температур потока и стенки гильзы, помещаемой в поток.

При помещении гильзы в поток происходит теплообмен Q_1 между потоком (средой) и гильзой:

$$Q_1 = Fk\Delta t,$$

где F — поверхность гильзы, омываемая потоком, m^2 ;

k — коэффициент теплопередачи от потока к внутренней поверхности гильзы, $ккал/m^2 \cdot ч \cdot град$;

Δt — разность между средней температурой потока t_1 у гильзы и температурой t_2 внутренней поверхности ее донышка, измеряемой термометром или термопарой (рис. 2-11).

Величина Δt составляет ошибку измерения за счет гильзы и равна нулю, когда $t_2 = t_1$.

Для уменьшения ошибки необходимо, чтобы гильза была установлена в хорошо перемешанном потоке, передача тепла от потока к термометру (термопаре) через гильзу была интенсивной, а постороннее тепловое влияние на дно гильзы помимо потока, т. е. подвод или отвод тепла Q_2 излучением и теплопроводностью, было ничтожно. Тогда

$$Q_1 = Q_2 \approx 0$$

и.

$$\Delta t \approx 0.$$

Ошибка Δt_1 , вызванная утечкой тепла от конца гильзы к стенке трубопровода, приблизительно определяется из уравнения [Л. 20]:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t'}{\operatorname{ch} \left(l \sqrt{\frac{\alpha \pi d}{\lambda f}} \right)},$$

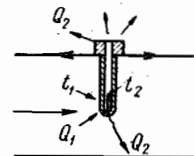


Рис. 2-11. Схема подвода и отвода тепла у термометрической гильзы.

где $\Delta t'$ — разность температур конца гильзы t_2 и стенки t_3 трубопровода, °C;

l — глубина погружения гильзы, м;

α — коэффициент теплоотдачи от измеряемой среды к стенке гильзы, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$;

d — наружный диаметр гильзы, м;

λ — коэффициент теплопроводности материала гильзы, $\text{ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$;

f — площадь поперечного сечения гильзы, м^2 ;

ch — гиперболический косинус величины в скобках по математическим таблицам.

Величина гиперболического косинуса характеризуется следующими цифрами:

x	1	2	4	6	8
$\text{ch } x$	1	3,76	27,3	200	1490

Пример. Для стальной гильзы в перегретом паре при $\Delta t' = 10^\circ \text{C}$, $l = 0,15 \text{ м}$, $d = 0,02 \text{ м}$, $\alpha = 100 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, $\lambda = 50 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$ получаем:

$$\Delta t_1 = \frac{10}{\text{ch} \left(0,15 \sqrt{\frac{100 \cdot 3,14 \cdot 0,02}{50 \cdot \frac{3,14}{4} (0,02^2 - 0,016^2)}} \right)} = \frac{10}{\text{ch } 4,95} = \frac{10}{70,7} = 0,14^\circ \text{C}$$

(для воды $\alpha \geq 1000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$ и $\Delta t_1 \leq 0,01^\circ \text{C}$).

Величину t_3 можно определить путем приварки термомпары к бобышке гильзы, с тепловой изоляцией места приварки.

При больших скоростях потока его температура у гильзы повышается на Δt_2 вследствие торможения и частичного превращения кинетической энергии в тепловую:

$$\frac{mc^2 A}{2g} = mc_p \Delta t_2,$$

откуда

$$\Delta t_2 = \frac{Ac^2}{2gc_p},$$

где $A = 1/427$, $\text{ккал/кг} \cdot \text{м}$;

c — скорость потока, м/сек ;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$;

c_p — теплоемкость при постоянном давлении, $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$.

Погрешность Δt_2 имеет положительный знак и способствует уменьшению общей погрешности; при больших скоростях она может быть значительной.

Пример. Для пара при $c = 70 \text{ м/сек}$

$$\Delta t_2 = \frac{70^2}{427 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} = 1,2^\circ \text{C}$$

при условии полного торможения, т. е. если «коэффициент восстановления» равен единице (обычно он меньше).

Устройство для измерения температуры среды отвечает своему назначению, если выполнены перечисленные ниже требования.

1. Термометрическая гильза

Термометрическая гильза удовлетворяет следующим условиям:

а) гильза расположена:

в активном потоке, вне застойных зон, на прямолинейном участке трубопровода (или на колене), на расстоянии не менее 18 диаметров от запорной арматуры, могущей отклонить поток;

при смешении потоков с разной температурой — за последующим коленом на достаточном расстоянии от места смешения, за насосом (с учетом возможного нагрева в самом насосе);

на расстоянии не более 4 м от места измерения, при возможности охлаждения или нагрева потока в трубопроводе;

в стенке небольшой толщины с минимальным ее тепловым влиянием на гильзу (особенно в потоке пара и воздуха);

вдали от поверхностей с температурой, не равной температуре потока, особенно пара и воздуха;

в больших сечениях с неравномерной температурой потока (на сливах охлаждающей воды из конденсатора) — расположено несколько гильз в одной плоскости сечения потока;

б) длина погруженной части гильзы $l = 0,5D + 5 \text{ мм}$ (рис. 2-12, а). В трубе диаметром $D < 200 \text{ мм}$ — гильза длиной $l = 100 \text{ мм}$ на воде и 150 мм на паре установлена на колене трубы или под углом к ее оси (рис. 2-12, б); при $D \geq 500 \text{ мм}$ длина гильзы $l = 250 \text{ мм}$;

в) внутренний диаметр гильзы равен 8—14 мм. — по диаметру термометра, термопары и по условиям прочности. Толщина стенки гильзы должна быть минимальной, но достаточной по прочности, особенно в ответственных

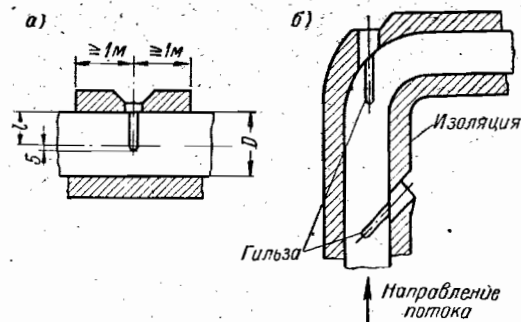


Рис. 2-12. Расположение термометрической гильзы.

местах: в трубопроводе свежего пара, в проточной части;

г) материал гильзы и бобышки выбирается в зависимости от измеряемой температуры [Л. 10, стр. 29]:

Температура °С	Марка-стали
До 400	10, 15, 20, 25
401—450	15М, 20М
451—520	20М, 15ХМ, ЭИ-257

д) гильза установлена вертикально или под углом, отверстием вверх; доннышко — навстречу потоку (рис. 2-12, а и б);

е) бобышка (без металлической наружной оправы) и трубопровод на длине 1 м в обе стороны от нее имеют хорошую тепловую изоляцию (рис. 2-12, а);

ж) наружная и внутренняя поверхность гильзы — чистые;

з) контакт между гильзой и термопарой или ртутным сосудом термометра хороший: через каплю воды (до 90° С), масла (до 140° С) или через металлические опилки (выше 140° С) в гильзе лишь в пределах активной части ртутного сосуда или «горячего» спая (для уменьшения тепловой инерции и потерь от конвекции воды или масла); хороший

контакт обеспечивается приваркой «горячего» спая термопары к доннышку гильзы;

и) для повышения точности измерения в случае недостаточно интенсивной теплоотдачи от потока к гильзе — при малой скорости потока пара или воздуха применяются: ребристая гильза (более сложная в изготовлении и в монтаже, чем гладкая);

отсасывающая гильза (в недоступных для простой гильзы местах);

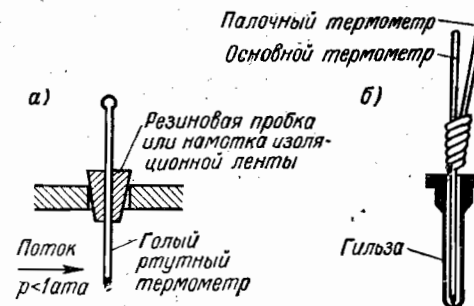


Рис. 2-14. Схемы установки голого термометра (а) и измерения температуры выступающего столбика ртути (б).

проточная гильза — на охлаждающей воде (рис. 2-13); малоинерционная термопара [Л. 25, т. 2, стр. 455]; голый ртутный термометр — при $p < 1$ атм (рис. 2-14, а).

2. Ртутный термометр

Ртутный термометр должен удовлетворять следующим условиям:

а) тип и шкала термометра отвечают необходимому диапазону и точности измерения температуры;

лабораторные термометры со шкалой 0—50, 50—100, 100—150, 150—200, 200—250° С с наименьшими делениями 0,1 и 0,2° С (а также термометры сопротивления) — для измерения температуры пара, конденсата, охлаждающей воды до 250° С; погрешность 0,1—0,2° С;

технические термометры до 100° С и выше с делениями шкалы 1 и 2° С — для измерения второстепенных величин (температуры окружающего воздуха); погрешность 1—2° С. (Ртутные термометры точнее, так как ртуть не

смачивает стекло, и менее инерционны, чем другие жидкостные термометры, поскольку теплоемкость ртути мала — 0,03 ккал/кг·град);

б) столбик ртути выступает из гильзы, так что для отсчета не нужно вынимать термометр;

в) возможная погрешность за счет выступающего столбика ничтожна, либо при его большой величине измеряется температура столбика и вводится соответствующая поправка;

г) столбик ртути не имеет разрывов, в капилляре нет пузырьков ртути, а в резервуаре — пузырьков воздуха (для устранения разрыва необходимо путем нагрева или охлаждения переместить ртуть в верхний или нижний резервуар; если это не помогает, — термометр непригоден); движение ртути в капилляре происходит равномерно, без скачков и задержек;

д) вставленная шкала не разбита и при опрокидывании термометра не смещается по отношению к имеющейся метке на его оболочке более 0,5 наименьшего деления шкалы; резервуар без трещин, по внешним признакам термометр исправен; паспорт не просрочен; отметки делений и цифры шкалы — четкие;

е) на рабочем месте термометр доступен наблюдению, хорошо освещен и огражден от случайных повреждений;

ж) погруженная часть обвита асбестовым шнуром для устранения конвекции в гильзе и вибрации термометра;

з) ртутный сосуд на дне гильзы погружен в воду, масло или в металлические опилки.

Поправки к показаниям ртутного термометра

Действительная температура t_d по показаниям t_t ртутного термометра равна:

$$t_d = t_t + \Delta t_n + \Delta t_{ct},$$

где Δt_n — поправка по паспорту термометра;

Δt_{ct} — поправка на температуру столбика ртути, выступающего из гильзы, вызванная тем, что термометры градуируются при полном погружении.

Если термометр (технический) градуировался при погружении только хвостовой части (о чем свидетельствует

надпись на обороте шкалы), и вся она во время измерения помещается в гильзе, то поправка Δt_{ct} не нужна.

Поправка Δt_{ct} определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{ct} = \gamma (t_t - t_1) n \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

где $\gamma = 0,00016$ — коэффициент видимого расширения ртути в стекле;

t_t — показания термометра, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 — средняя температура выступающего столбика ртути, определяемая приблизительно по палочному термометру, резервуар которого под изоляцией укреплен на середине столбика (рис. 2-14, б);

n — число градусов по шкале на длине выступающего столбика.

Поправка на выступающий столбик ртути велика при больших значениях t_t и n , но даже при измерениях температуры до 100°C лабораторным ртутным термометром с диапазоном шкалы в 50°C может составить $0,5^{\circ}\text{C}$. Погрешность самой поправки также велика и достигает $\pm 10\%$.

Со временем термометры стареют — смещается вверх нулевая точка вследствие уменьшения объема стеклянного резервуара; поэтому необходима периодическая их проверка. Смещение нулевой точки определяется как разность между нулем шкалы и показанием термометра при погружении его в тающий лед после того, как он был нагрет до предельной для его шкалы температуры. На величину этой разности вносится поправка к показаниям термометра, если не производилась его тарировка.

3. Термопара и соединительные провода

Термопара состоит из двух спаянных на одном конце разнородных изолированных друг от друга электродов. Основные данные применяемых термопар приведены в табл. 2-3.

Свойства материала термопар со временем изменяются, их однородность по длине нарушается, особенно при работе вблизи верхнего температурного предела, вследствие чего возможно появление паразитных термо-э. д. с. в каждом из электродов,

Наименование	Материал термоэлектродов термопар		
	Платина — платинородий	Хромель — алюминель	Хромель — копель
Условное обозначение градуировки	ПП	ХА	ХК
Термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.) в мВ в зависимости от температуры рабочего конца — см. приложение	IV 1300	V 1000	VI 600
Допустимая длительная температура, °С	П —	Х +	Х +
Полярность электродов	Н —	Н —	Н —
Отношение к намагничиванию: магнитен (М), немagnetен (Н)	0,0025	0,0004	0,0004
Удельное сопротивление, ом·мм ² /м	0,1	1,35	1,35
Температурный коэффициент сопротивления	—	—	—
Присоединяемый компенсационный провод, его материал, цвет сигнальной оплетки	Сплав — зеленый — медь — красный	Медь — красный или хро-мель — фиолетовый	Хро-мель — желтый — фиолетовый
Допустимая погрешность термо-э. д. с. против градуировочной таблицы приложения	$\begin{cases} 300^{\circ}\text{C} \pm 0,01 \\ \text{термо-э. д. с.} \\ 300^{\circ}\text{C} \pm 3 \cdot 10^{-5} \end{cases}$	$\begin{cases} \pm 4^{\circ}\text{C} \\ \pm 0,01 \text{ термо-э. д. с.} \end{cases}$	$\begin{cases} \pm 4^{\circ}\text{C} \\ \pm 0,01 \text{ термо-э. д. с.} \end{cases}$

Примечание. О других материалах термопар см. [Л. 20]

Термопары тарируют через 50° С, помещая их вместе с эталоном в электрическую трубчатую печь с реостатом на глубину 150 и 300 мм. В качестве эталона служит образцовая платиновая термопара или образцовый термометр сопротивления с электронным мостом.

Термопары применяют для измерения температур выше 250° С, а также ниже 250° С — в местах недоступных для лабораторного ртутного термометра.

Диаметр электродов рекомендуется не более 1 мм для уменьшения отвода тепла от «горячего» спая и его тепловой инерции. Из-за большего значения термо-э. д. с. предпочтительна термопара ХК.

Провода могут быть медные, алюминиевые, и в этих случаях требуется измерение температуры (обычно переменной) примыкающих к ним «холодных» концов термопары. Применяют компенсационные провода из материалов, между которыми при температуре до 100° С термо-э. д. с. такая же, как и для термоэлектродов.

Компенсационные провода удлиняют термопару и отводят «холодный» спай в зону, где его температура постоянна и ее удобно измерять. Надежнее длинная термопара без компенсационных проводов и переходных контактов.

Длина проводов желательна минимальная, сечение — до 1 мм², в целях уменьшения их веса при умеренном сопротивлении.

Термопара и соединительные провода выполнены правильно, если они отвечают следующим условиям:

а) термопара имеет свой номер, проверена в нужном интервале температур по эталону более высокого класса и результаты проверки оформлены протоколом (см., например, приложение 3-10 для манометров);

б) электроды надежно изолированы фарфоровой трубкой, бусами или асбестовым шнуром и без чехла вставлены в гильзу; конвекция в гильзе устранена общей асбестовой обмоткой термопары;

в) «горячий» спай прочный, без трещин, имеет хороший контакт с дном гильзы через масло или металлические опилки на высоте спая; вблизи «горячего» спая электроды перевиты, причем витков не более двух (рис. 2-15);

г) температура «холодных» спаев термопар, т. е. в местах перехода электродов или компенсационных про-

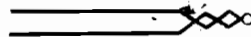


Рис. 2-15. Образование «горячего» спая термопары.

водов на простые (медные) провода, точно (до $0,1^\circ\text{C}$) измеряется в термостате, где исключено влияние местного излучения и конвекции, в сосуде с тающим льдом;

д) суммарное сопротивление термопары и соединительных проводов не выше паспортной величины: для электромеханического и электронного потенциометров — 100 ом, для переносного потенциометра типа ПП — 20 ом; увеличение сопротивления до 200—300 ом практически не оказывает заметного влияния на чувствительность электронного потенциометра;

е) материал компенсационных проводов соответствует электродам по табл. 2-3;

ж) провода нигде не образуют петель, не перевиты между собой, не подвержены электромагнитному воздействию или экранированы — для электронного потенциометра;

з) в присоединениях проводов к электродам и к потенциометру соблюдена полярность; обеспечен хороший контакт; повешены проверенные маркировочные бирки на проводах.

4. Потенциометры

Наиболее точным методом измерения термо-э. д. с. является компенсационный (посредством потенциометра) благодаря отсутствию тока в цепи в момент замера.

Широко применяются следующие типы потенциометров: переносный типа ПП, электромеханический типа СП, электронные типов ЭПП-09, ЭПД и ЭПВ.

Переносный потенциометр типа ПП

Для измерения температуры во многих точках этим прибором требуется переключатель. Потенциометр в работе неудобен из-за необходимости тщательной настройки при каждом отсчете и большой чувствительности к сопротивлению проводов, как это видно из следующих ориентировочных данных:

Сопротивление проводов, ом	20	50	100
Порог чувствительности, мв	0,02	0,05	0,1

Основная погрешность измерения этим потенциометром составляет $\pm 0,02$ мв,

а) Автоматические потенциометры

Потенциометры типов СП и ЭПП-09 имеют следующую характеристику:

	Электромеханический типа СП	Электронный типа ЭПП-09
Класс	0,5	0,5
Основная погрешность показаний при $t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$, %	$\pm 0,5$ *	$\pm 0,5$ *
Основная погрешность записи, %	—	$\pm 0,05$
Порог чувствительности в процентах от диапазона шкалы	—	$\pm 0,1$
Дополнительная погрешность показаний и записи за счет отклонения $t_{\text{окр}}$ на $\pm 10^\circ\text{C}$ от 20°C , %	—	$\pm 0,1$
Дополнительная погрешность записи за счет отклонения относительной влажности воздуха на $\pm 10\%$ от 60% для диаграммной бумаги, %	—	$\pm 0,15$
Допустимая величина $t_{\text{окр}}$, $^\circ\text{C}$	$0 \div +50$	$0 \div +50$
Число точек измерения	До 6	До 24

Учитывая значительно меньшую чувствительность к сопротивлению проводов, более частую (до десяти раз) запись показаний, электронный потенциометр следует считать лучшим электромеханического.

Проверенный электронный однотоочный потенциометр типа ЭПД или ЭПВ с переключателем на несколько диапазонов лучше переносного потенциометра типа ПП, который, однако, надежнее для контрольных замеров в сомнительных случаях.

Показания переносного потенциометра типа ПП и в случае применения компенсационных проводов требуют поправки на температуру «холодного» спая — у зажимов потенциометра по следующему выражению (рис. 2-16):

$$TЭДС_A = TЭДС_П + TЭДС_Б,$$

где $TЭДС_П$ — показания потенциометра;

$TЭДС_Б$ — по приложениям V—VII для температуры «холодного» спая у зажимов потенциометра в точке Б, определяемой по точному ртутному термометру;

* От разности верхнего и нижнего пределов.

$T_{ЭДС_A}$ — величина, которой по приложениям V—VII отвечает действительно измеренное значение температуры «горячего» спая.

Температурная поправка к показаниям автоматического самопишущего потенциометра незначительна благодаря автоматической компенсации температуры «холодного» спая (см. указанную выше погрешность $\pm 0,1\%$ на отклонение $\pm 10^\circ \text{C}$ от 20°C).

б) Проверка работы потенциометра

Переносный потенциометр должен отвечать следующим условиям:

а) стрелка 1 находится на нуле шкалы, когда переключатель 2 в положениях К и И — в момент отсчета показания по шкале 4 (рис. 2-17);

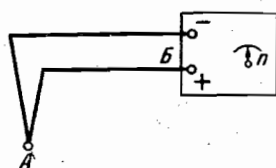


Рис. 2-16. Схема измерения термопарой и переносным потенциометром. А — «горячий» спай термопары; Б — «холодный» спай термопары.

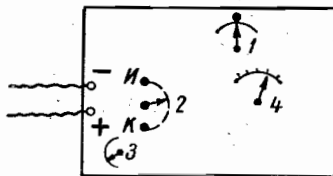


Рис. 2-17. Схематический вид сверху на переносный потенциометр.

1 — стрелка гальванометра; 2 — переключатель гальванометра; 3 — секционированный переключатель; 4 — реохорд.

б) аккумуляторная батарея не истощена;

в) контакты на переключателе точек измерения проверены;

г) показания совпадают с показаниями дублирующего прибора.

Автоматический потенциометр должен отвечать следующим условиям:

а) напряжение тока питания соответствует паспорту двигателя; заземление надежное;

б) механический и электрический нули выверены;

в) показания стрелки совпадают с записью и согласуются с показаниями дублирующих или контрольных приборов;

г) бумага не перекошена, приводные зубцы находятся в отверстиях бумаги, ее скорость удовлетворительная;

д) запись четкая, тонкая; цвета на бумаге и на указателе совпадают;

е) последовательность точек соответствует порядку возрастания или убывания температур, для сокращения пути реохорда;

ж) под стеклом потенциометра имеется маркировочная таблица измеряемых величин с указанием номеров термопар и номеров точек по указателю;

з) температура потенциометра находится в пределах $0-50^\circ \text{C}$; его положение устойчивое; освещение хорошее (см. общие требования на стр. 98).

в) Погрешность измерения температуры термопарой

Определение общей погрешности измерения нетарированной термопарой ХК и электронным потенциометром типа ЭПП-09 поясняется следующим примером.

Дано: шкала потенциометра $0-600^\circ \text{C}$; измеряемая температура 300°C .

По этим данным находим: погрешность потенциометра (см. стр. 125)

$$0,5 \cdot \frac{600}{100} = \pm 3^\circ \text{C};$$

погрешность термопары, составляющую $\pm 4^\circ \text{C}$ (см. табл. 2-3).

Средняя квадратичная погрешность (см. стр. 225) составит:

$$\sigma_t = \frac{1}{3} \sqrt{3^2 + 4^2} = \pm 1,7^\circ \text{C},$$

а при шкале $200-400^\circ \text{C}$:

$$\sigma_t = \frac{1}{3} \sqrt{0,5 \left(\frac{400-200}{100} \right)^2 + 4^2} = \frac{1}{3} \sqrt{1^2 + 4^2} = \pm 1,3^\circ \text{C}.$$

Правильным выполнением и тщательной тарировкой термопары и потенциометра погрешность измерения можно снизить до $0,5-1^\circ \text{C}$.

2-6. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Давление выхлопа измеряют в выхлопном патрубке — за последними рабочими лопатками, в горловине конденсатора и перед эжектором, для определения парового сопротивления тракта.

При относительно малом давлении и большой скорости потока на выхлопе турбины динамическая составляющая давления может заметно исказить измерение статического давления:

$$\Delta p_{\text{дин}} = \frac{c^2 \gamma}{2g} [\text{кг/м}^2], \text{ или } \Delta p_{\text{дин}} = \frac{c^2 \gamma}{2 \cdot 9,81 \cdot 10^4} [\text{кг/см}^2].$$

В приведенной формуле скорость c выражена в м/сек; а удельный вес γ — в кг/м³.

Пример. Дано: скорость пара в конденсаторе $c = 100$ м/сек; $\gamma = 0,040$ кг/м³.

По указанным данным находим:

$$\Delta p_{\text{дин}} = \frac{100^2 \cdot 0,040}{20 \cdot 10^4} = 0,002 \text{ ата, или } 1,5 \text{ мм рт. ст.}$$

Для измерения статического давления в конденсаторе применяют специальные сетчатые насадки — зонды, ослабляющие влияние скорости потока (см. рис. 2-3, в); выбирают точку забора в «мертвой» зоне — в области атмосферной трубы и т. п.

При малом расходе пара (холостом ходе) проверяют совпадение давлений во всех точках измерения.

Температуру пара выхлопа и паро-воздушной смеси при $p_2 < 1$ ата измеряют голым термометром в таком месте, где она не искажена посторонним влиянием (близостью трубного пучка, вводом потока пара или воды).

Температуру дренажа из теплообменников измеряют непосредственно на выходе — до дросселя водоотводчика или после насоса с учетом нагрева в нем.

Температуру воды после подогревателей измеряют в двух местах: непосредственно на выходе из подогревателя и после его обвода или перед следующим подогревателем, если между ними нет подвода других потоков.

Давление и температуру пара перед подогревателями измеряют независимо от измерений в камерах и линиях отборов у турбины.

Температуру свежего пара измеряют не менее чем в трех точках, в том числе перед измерительной диафрагмой и перед стопорным клапаном.

Падение давления в трубопроводах отбора измеряют дифманометром либо двумя ртутными или образцовыми манометрами.

Температуру охлаждающей воды на сливах из конденсатора поддерживают одинаковой (до 0,5° С), так как

расход воды в каждом потоке неизвестен; кроме того, измеряют температуру на общей сливной линии после смешения потоков (в одной-двух точках).

За паровпускными клапанами измеряют лишь давление, а теплосодержание пара считают таким же, как и перед стопорным клапаном, полагая потери от наружного охлаждения ничтожными.

При неполном открытии регулирующих клапанов температурное поле потока пара в камере отбора неравномерно. Поэтому трудно судить о средней температуре пара в камере отбора по его температуре в трубопроводе отбора, где, однако, в любом случае необходимо исключить местное влияние побочных потоков (отсоса пара из уплотнений), например, путем отвода их ближе к подогревателю или на сторону (в конденсатор) — см. [Л. 29, стр. 27].

Расход пара из отбора должен быть значительным, учитывая его охлаждение в трубопроводе и необходимость обеспечения достаточной теплоотдачи гильзе.

Более надежны измерения температур, производимые в самой проточной части при полностью открытых клапанах.

Точное измерение давления и температуры свежего пара и пара отборов особенно важно для правильного определения внутреннего относительного к. п. д. и мощности проточной части (отдельных отсеков) при малой величине располагаемого теплопада. Например, ошибка при измерениях давления в $\pm 1\%$ и температуры пара в $\pm 1^\circ \text{С}$ может вызвать ошибку около 5% в определении величины к. п. д. при $h_0 = 25$ ккал/кг.

Как правило, следует измерять температуру хорошо перемешанных потоков, либо каждого из них до смешения, определяя затем из выражения

$$t_{\text{ср}} = \frac{D_1 t_1 + D_2 t_2}{D_1 + D_2}$$

среднюю температуру измеряемых потоков.

2-7. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ПАРА И ВОДЫ

Расход пара и воды обычно измеряют нормальной диафрагмой или соплом (погрешность измерения — до $\pm 3\%$).

Для воды наиболее точным является измерение расхода посредством мерного бака (погрешность — около $\pm 0,2\%$).

В теплообменниках расход одного из потоков пара или воды часто определяют из уравнения теплового баланса по измеряемым параметрам и расходам других потоков (наименее точный способ). Перед диафрагмой и соплом требуется измерение давления и температуры среды для определения ее удельного веса.

Условия применения, изготовления и монтажа камерной диафрагмы — более точной, чем бескамерная, и более простой в изготовлении, чем сопло, приведены на рис. 2-18, 2-19 и 2-20. Все данные заимствованы из Правил 27-54 [Л. 18].

Невыполнение какого-либо из перечисленных требований вызывает ошибку неизвестной величины и потому недопустимо.

Неправильно выполненную диафрагму ($D < 50$ мм; $0,05 < m < 0,7$ и др.) можно протарировать по временной правильной диафрагме или по баку и установить для нее поправочный коэффициент (см. ниже).

При установке диафрагмы проверяют выполнение перечисленных требований и составляют акт проверки — по приложению 3-11.

Примерами рабочих чертежей камерной диафрагмы для ее изготовления могут служить рис. 2-21 и 2-22.

На свежем паре высокого давления, вследствие большого удельного веса пара и сравнительно малого диаметра трубопровода, расчетная величина перепада h_p часто получается больше предельной для расходомера (1000 мм рт. ст.) даже при наибольшем допустимом отношении $m = 0,7$. В этом случае применяют сопло, в котором перепад h почти в два раза меньше, чем в диафрагме.

Правила расчета и изготовления сопла, а также бескамерной диафрагмы — см. [Л. 18].

1. Расчет диафрагмы

а) Основная формула расчета диафрагмы

Основными формулами для определения объемного и весового расходов пара и воды через отверстие диафрагмы являются

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P} \text{ [м}^3/\text{сек];}$$

$$G = \alpha F_0 \sqrt{2g\gamma \Delta P} \text{ [кг/сек].}$$

Рис. 2-18. Нормальная камерная диафрагма: а — схема устройства; б — эскиз диафрагмы.

Элементы устройства:
диафрагма;
две соединительные трубки — см. стр. 102;
дифманометр (рис. 2-18, а) — см. стр. 113.

Условия применения
Применение диафрагмы в трубопроводе круглого сечения разрешается только при выполнении следующих требований (рис. 2-18, 2-19, и 2-20):

$$D \geq 50 \text{ мм};$$

$$0,05 < m < 0,7, \text{ где } m = \frac{d^2}{D^2}.$$

При любом расположении в пространстве трубопровода до и после диафрагмы имеет одинакового диаметра прямые участки длиной l_1 (рис. 2-20) и $l_2 \geq 5D$.

Все его сечение заполнено однородной средой: вода при $t < t_{\text{нас}}$ перегретый пар.

При $m \leq 0,5$ допустимы вдвое меньшие значения l_1 и l_2 с дополнительной погрешностью коэффициента расхода $\pm 0,5\%$.

Изготовление

$$d_{\text{факт}} = d_{\text{расч}} \begin{cases} \pm 0,001d & \text{при } m \leq 0,45 \\ \pm 0,0005d & \text{при } m > 0,45 \end{cases}$$

В четырех диаметрально противоположных направлениях: $D_K = D$. Допустимо $D_K > D \geq 0,95D_K$, если

$$l_K \leq \begin{cases} 0,2D & \text{при } m \leq 0,2 \\ 0,15D & \text{при } m \leq 0,5 \\ 0,1D & \text{при } m \leq 0,7 \end{cases}$$

Диаметр равен 8–12 мм.
 $C = 0,03D$; $1 \text{ мм} \leq C \leq 5 \text{ мм}$.

$$ab = \pi DC; ab \geq \frac{\pi DC}{2}$$

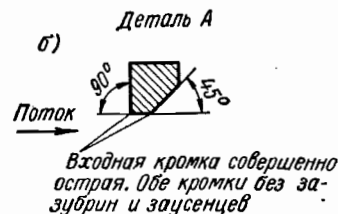
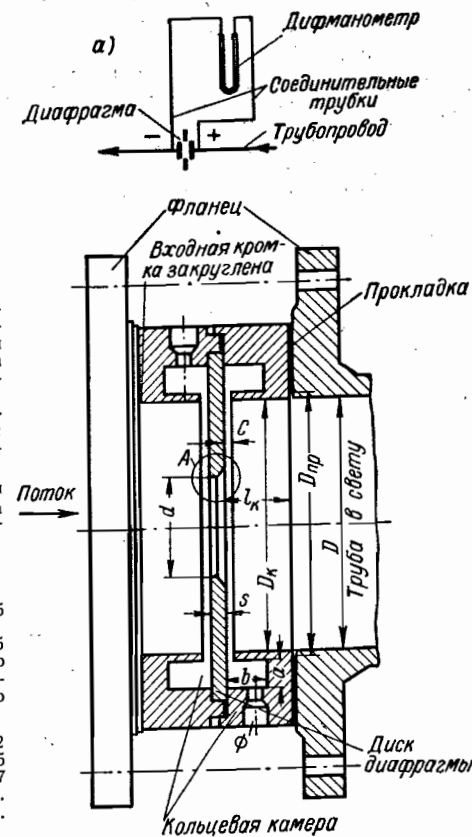
при $D > 200$ мм.
 s — по расчету на прочность [Л. 18, стр. 17].

Для перепада давления $h \leq 1000$ мм рт. ст. допустимы следующие значения s/D в зависимости от m :

$$\frac{s}{D} \begin{matrix} 0,08 & 0,4 & 0,8 \end{matrix} \begin{matrix} \geq 0,035 & 0,025 & 0,015 \end{matrix}$$

$$D_{\text{пр}} = D + 2 + 3 \text{ мм.}$$

Неплоскостность диска диафрагмы $\leq 0,003$.



Материал (стр. 118):

Температура, °С	Марка стали
До 400	10, 15, 20, 25
401–450	15М, 20М
451–520	20М, 15ХМ, ЭИ-257

Если через один-два месяца работы диафрагма будет вынута, применяется обыкновенная углеродистая сталь.

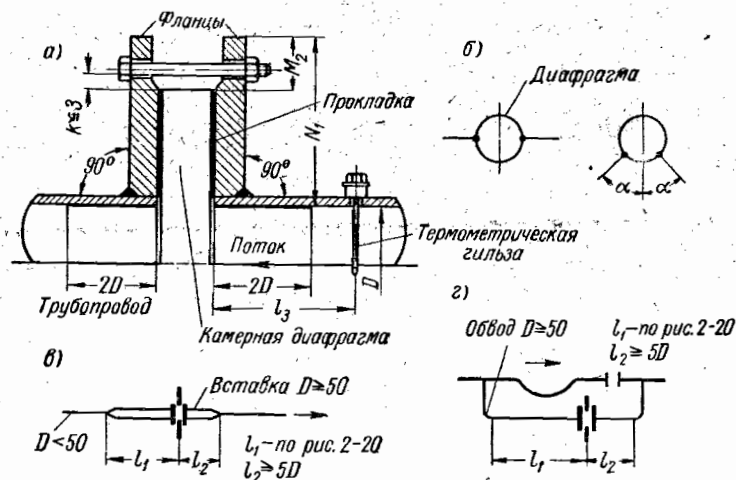


Рис. 2-19. Монтаж камерной диафрагмы: а — установка диафрагмы между фланцами трубопровода; б — расположение импульсных отверстий в диафрагме; в и г — вставка и обвод для установки диафрагмы.

Монтаж

У диафрагмы и на расстоянии $2D$ от нее:
а) на внутренней поверхности трубы недопустимы уступы, наросты, неровности (заклепки, сварочные швы и др.);
б) результаты отдельных измерений D в четырех диаметрально противоположных направлениях не должны отличаться от среднеарифметического значения (вследствие конусности, эллиптичности, деформации) более чем на

$$\pm 0,5\% \text{ при } m \geq 0,3 \\ \pm 2\% \text{ » } m < 0,3.$$

Среднеарифметические величины $D_{\text{ср}}$ и $d_{\text{ср}}$ при 20°C внести в паспорт диафрагмы с точностью 0,05%.

Расстояние от термометрической гильзы до диафрагмы:

$$l_3 \geq 4D \text{ при } d \text{ гильзы} = 0,02 \\ l_3 \geq 10D \text{ » } d \text{ » } = 0,04 \\ l_3 \geq 30D \text{ » } d \text{ » } = 0,15$$

При одинаковой температуре потока до и после диафрагмы допускается установка гильзы на расстоянии $\geq 5D$ после диафрагмы.

Отклонение центра диафрагмы от центра сечения трубы не более $0,01D$ (центрируется по болтам или выточкам фланцев — см. M_1, M_2 или K на рис. 2-19, а).

Со стороны входа потока торец диска диафрагмы перпендикулярен к оси отверстия трубы. Поток входит со стороны острой кромки по рис. 2-18, б.

При $D \leq 80$ мм диафрагму установить между двумя патрубками, расточенными до $D_{\text{расч}}$ и затем вварить их в трубопровод. Длина патрубков до диафрагмы $l_1 \geq 8D$, после диафрагмы $l_2 \geq 5D$. Такой способ рекомендуется и при $D > 80$ мм.

Направление отверстий у диафрагмы для соединительных трубок — под углом $\alpha = 30^\circ$ или 45° вниз или же горизонтальное (для предотвращения попадания растворенного воздуха и грязи) — см. рис. 2-19, б.

У диафрагмы установить коренные вентили для соединительных трубок.

В тех случаях, когда $D < 50$ мм или $l < l_1$, по рис. 2-20 монтировать специальную вставку или обвод по рис. 2-19, в, г.

При установке диафрагмы между насадными фланцами торец трубопровода должен примыкать к кольцевой камере.

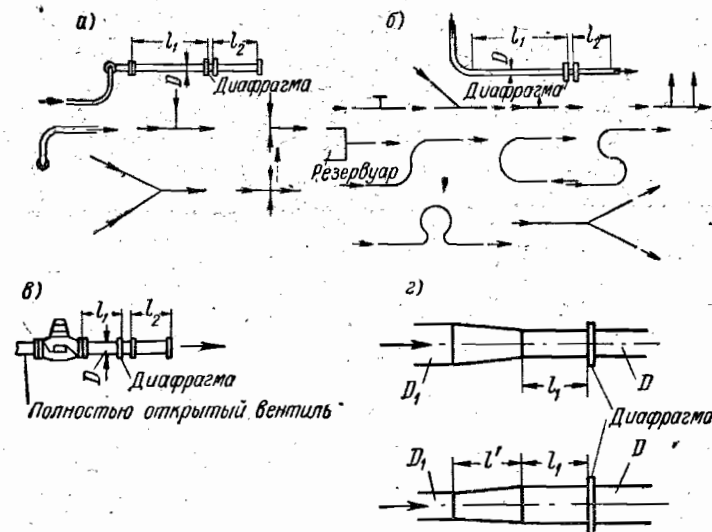


Рис. 2-20. Наименьшая длина прямого участка l_1 трубопровода перед диафрагмой, установленной:

а — за местным сопротивлением, создающим вихревое движение потока:

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
l_1/D	35	35	35	36	37	39	43

б — за местным сопротивлением, не создающим вихревого движения потока:

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
l_1/D	3	5	10	15	20	30	38	45

в — за полностью открытым вентилем:

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
l_1/D	5	7	11	15	18	22	26

г — за сужением или расширением трубопровода.

За сужением:

$$l_1 \geq 6D, \text{ если } D_1 \leq 1,05D;$$

$$l_1 \geq 8D, \text{ если } 1,05D < D_1 \leq 1,1D.$$

Если уклон сужения не более 1,1 и концы его закруглены, допустимо уменьшение l_1 вдвое.

За расширением:

$$l_1 \geq 10D \text{ при } m < 0,2;$$

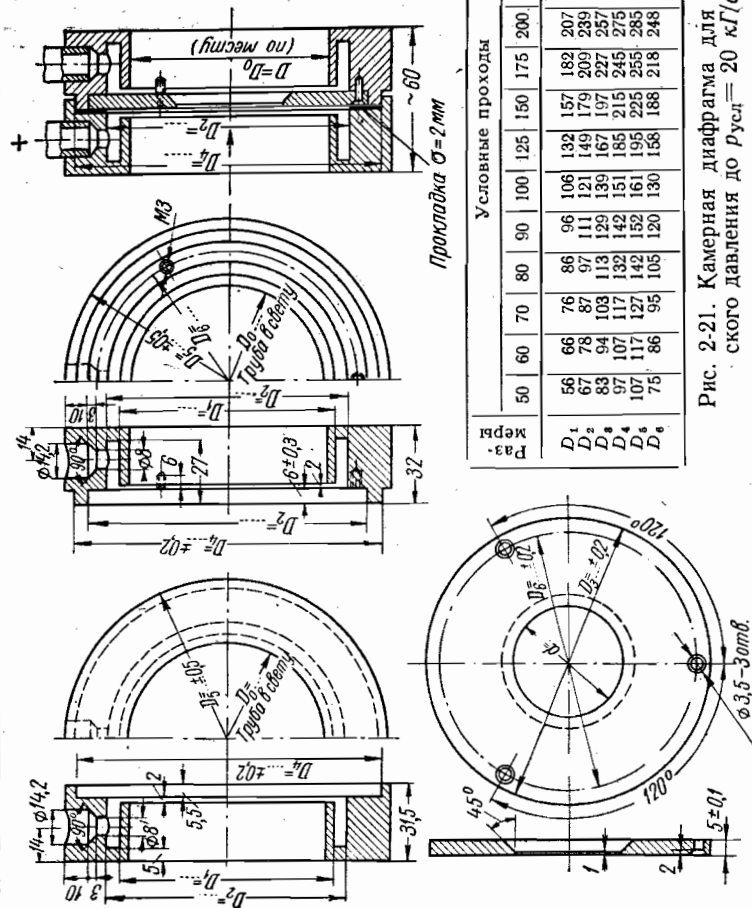
$$l_1 \geq 20D \text{ при } 0,25 \leq m \leq 0,5, \text{ если } D_1 = 0,5D \text{ и } l' = 1,8D$$

(следует принимать l_1 по наибольшему из значений для всех сопротивлений перед диафрагмой).

д — за местным сопротивлением типа б при дополнительной средней квадратичной погрешности 1—2%;

е — за местным сопротивлением типа а при дополнительной средней квадратичной погрешности 1%.

Во всех случаях $l_2 \geq 5D$.



Раз- меры	Условные проходы															
	50	60	70	80	90	100	125	150	175	200	225	250	275	300	307	356
D ₁	56	66	76	86	96	106	132	157	182	207	232	257	282	307	307	356
D ₂	67	78	87	97	111	121	149	179	209	239	264	294	324	356	356	356
D ₃	83	94	103	113	129	139	167	197	227	257	282	312	342	372	372	372
D ₄	97	107	117	132	142	151	185	215	245	275	300	330	360	390	390	390
D ₅	107	117	127	142	152	161	195	225	255	285	310	340	370	400	400	400
D ₆	75	86	95	105	120	130	158	188	218	248	273	303	333	363	363	363

Рис. 2-21. Камерная диафрагма для статического давления до $P_{\text{ст}} = 20 \text{ кг/см}^2$.

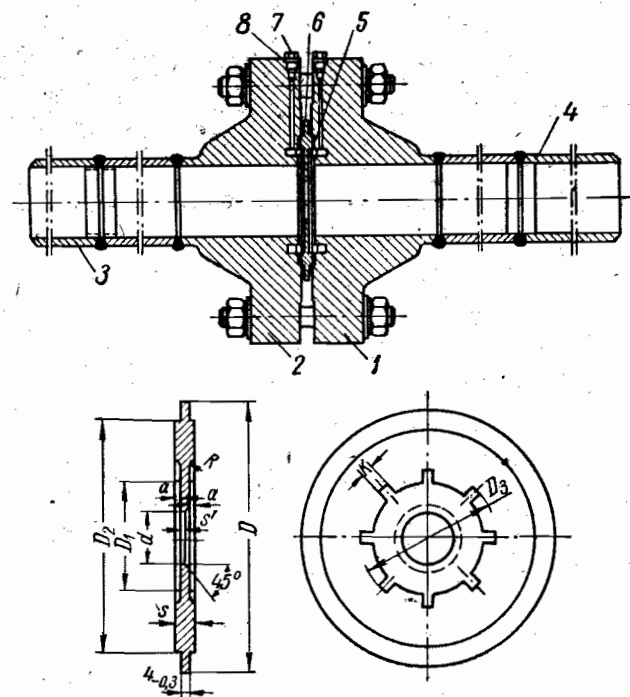


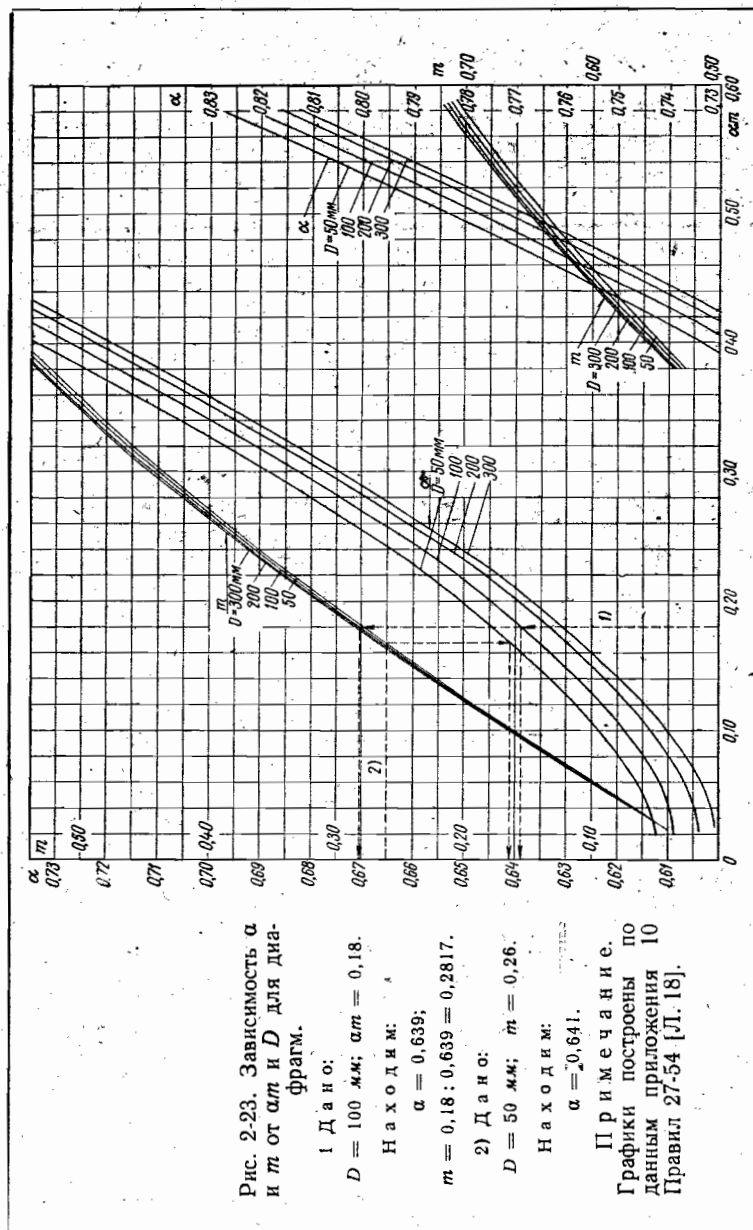
Рис. 2-22. Диафрагма для давления 100 кг/см^2 и температуры 510°C .

1 и 2 — фланец с патрубками; 3 и 4 — трубы;
5 — зубчатые прокладки; 6 — диафрагма; 7 — пробка;
8 — прокладка.

Размеры диафрагмы

Услов- ный проход	D ₁	D	D ₂	D ₃	k	s	a	s'	d
60	60	135	116	84	4	9	1,2	0,5	По расче- ту
80	80	160	133	106	4	9	1,7	0,5	
100	105	190	170	134	6	9	1,7	0,5	
125	130	235	214	162	8	9	2	0,5	
150	150	265	245	182	8	10	2	1	
175	173	290	268	203	8	10	2	1	
200	195	340	319	225	10	10	2	1	
225	217	340	319	247	12	10	2	1	

Примечание. $a + 0,12$; $s, + 0,2$; $r + 0,2$.
Из книги: С. Б. Гатеев, Теплотехнические испытания ко-
тельных установок, Госэнергоиздат, 1959.



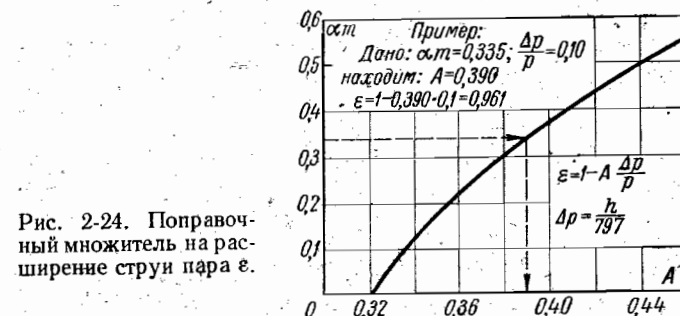
После замены величин F_0 и ΔP получаем для весового расхода в час:

$$G = 3600 \alpha \frac{\pi d^2}{4 \cdot 10^6} \sqrt{2 \cdot 9,81 \gamma \frac{h (13546 - 998)}{1000}}$$

или с учетом поправочных множителей k_t^2 и ϵ :

$$G = k k_t^2 \epsilon \alpha d^2 \sqrt{\gamma h} [\text{кг/ч}]; \quad (2-1)$$

здесь α — коэффициент расхода диафрагмы (рис. 2-23), зависящий от величин m и D ;



- F_0 — площадь сечения отверстия диафрагмы, м^2 ;
- $g = 9,81$ — ускорение силы тяжести (для 45° географической широты на уровне моря), м/сек^2 ;
- γ — удельный вес измеряемой среды перед диафрагмой (для указанного значения g), кг/м^3 ;
- ΔP — перепад давления в диафрагме, кг/м^2 ;
- d — диаметр отверстия диафрагмы при 20°C , мм ;
- h — перепад давления в диафрагме, выраженный в миллиметрах ртутного столба с противовесом равного столба воды при температуре 20°C и давлении 1 атм ;
- 13546 — удельный вес ртути (кг/м^3) при условиях, указанных для h и $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$;
- 998 — удельный вес воды при тех же условиях, что для ртути, кг/м^3 ;
- k_t^2 — поправочный множитель на тепловое расширение диафрагмы и трубопровода при температуре измеряемой среды (табл. 2-4);
- ϵ — поправочный множитель на расширение измеряемой среды при прохождении через отверстие диафрагмы (рис. 2-24), для воды $\epsilon = 1$;

$k = 0,04436$ — числовой множитель при температуре ртутного и водяного столбов в дифманометре 20°C .

Значения k при другой температуре приведены в табл. 2-5; влияние давления ничтожно — меньше $0,01\%$ на 100 атм .

Величину ΔP заменяет давление столба жидкости в дифманометре высотой $\frac{h}{1000} [\text{м}]$ и удельным весом $\gamma' = 13\,546 - 998 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta P = \frac{h}{1000} \gamma' [\text{кг/м}^2].$$

Таблица 2-4

Температура измеряемой среды, $^\circ \text{C}$	Материал диафрагмы			
	Ст. 20 20М 15ХМА 5М 12МХ Чугун	X17 X17H2 X6CM X7CM X5M	X23H13 X18H25C2 1X18H9T Бронза	
	k_t	k_t^2	k_t	k_t^2
100	1,0010	1,002	1,0015	1,003
150	15	3	20	4
200	20	4	30	6
250	30	6	40	8
300	35	7	50	1,010
350	40	8	60	12
400	50	1,010	65	13
450	55	11	75	15
500	65	13	85	17
550	75	15	90	18
600	80	16	95	19

Таблица 2-5

Температура ртутного столба, $^\circ \text{C}$	k	Температура ртутного столба, $^\circ \text{C}$	k
0	0,04445	30	0,04432
10	40	40	29
20	36	50	25

На отклонение географической широты места измерения от 45° и его высоты над уровнем моря от нуля требуются дополнительные поправки к числовому коэффициенту k , равные $\pm 0,15\%$ на $\pm 10^\circ$ широты и $-0,05\%$ на 1000 м высоты.

Указанные поправки учитывают изменение величины ускорения силы тяжести и пропорционального изменения удельного веса измеряемой среды и ртути в дифманометре, входящих в формулу (2-1).

Поправки подсчитаны, исходя из следующего выражения для величины ускорения силы тяжести:

$$g = 9,80606 - 0,02503 \cos 2\varphi - 0,000003 h,$$

где φ — географическая широта местности в градусах;

h — высота местности над уровнем моря, м .

Поправка к коэффициенту k равна:

$$\left[\sqrt{\left(\frac{g}{9,81} \right)^3} - 1 \right] \cdot 100 [\%].$$

Поправки на географическую широту и высоту местности в Правилах 27-54 не указаны, хотя они могут быть больше поправки на температуру ртутного столба.

б) Порядок расчета диафрагмы

Расчет диафрагмы заключается в определении диаметра d ее отверстия для заданных расчетных величин:

G_p — расхода измеряемой среды, кг/ч ;

γ_p — удельного веса измеряемой среды, кг/м^3 ;

t_p — температуры измеряемой среды, $^\circ \text{C}$;

h_p — перепада давления в диафрагме (ртуть минус вода), мм ;

D_p — диаметра трубопровода, мм .

Расчет производят с помощью формулы (2-2), рис. 2-23, 2-24; а также табл. 2-4 и 2-5 в следующем порядке:

$$a) \quad \alpha m = \frac{G_p}{k k_t^2 \varepsilon D_p^2 \sqrt{\gamma_p h_p}}, \quad (2-2)$$

где k_t^2 и k находят по табл. 2-4 и 2-5, а ε по рис. 2-24;

б) α определяют по рис. 2-23 для αm из п. «а»;

$$в) \quad m = \frac{\alpha m}{\alpha};$$

$$г) \quad d = D_p \sqrt{m}.$$

Расход проверяют по формуле

$$G_p = 0,04436 k_i^2 \varepsilon \alpha d^2 \sqrt{\gamma_p h_p} \text{ [кг/ч]}.$$

По этой же формуле определяют расход для диафрагмы с заданным диаметром отверстия d .

Формула (2-2) получена из формулы (2-1) после замены αd^2 на $\frac{\alpha d^2}{D^2} D^2$ или $\alpha m D^2$.

Благодаря относительно малому пределу изменения величины α (от 0,6 до 0,85) предлагаемый метод графического определения α по αm удобнее метода определения m по αm , рекомендуемого Правилами 27-54, и не уступает ему по точности результата при меньших размерах диаграммы (рис. 2-23).

Расчет диафрагмы для пара, в отличие от воды, несколько осложнен тем, что величина ε вначале неизвестна (см. ниже).

в) Выбор расчетных величин G_p и h_p

Для стационарных диафрагм и для расходомеров в зависимости от намечаемых максимальных значений G_p и h_p выбирают ближайшие к ним стандартные (ГОСТ 2864-45) значения:

$$G = (1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8) \cdot 10^n \text{ [т/ч]},$$

где n — любое целое число (положительное или отрицательное) либо нуль;

$$h = 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000 \text{ мм рт. ст. при } 20^\circ \text{С}.$$

Для диафрагм, устанавливаемых лишь на время испытания и без расходомеров, допустимы любые значения G_p и h_p .

При выборе h_p учитывают, кроме того, следующие требования и соображения:

а) при расходе G_p в возможном наинизшем давлении (для пара) величина h должна быть меньше шкалы дифманометра примерно на 50 мм; при наименьшем измеряемом расходе перепад $h \geq 100$ мм;

б) остаточная потеря давления в диафрагме (см. ниже) должна быть допустимой по условиям работы;

в) с увеличением перепада h_p :

уменьшается величина m и соответственно длина l_1 необходимого прямого участка трубопровода перед диафрагмой (рис. 2-20);

уменьшается погрешность измерения при отсчете показания дифманометра; для нетарированной диафрагмы уменьшается погрешность за счет коэффициента расхода; при измерении расхода пара повышается погрешность за счет коэффициента ε (см. ниже п. 2);

увеличивается остаточная потеря давления;

уменьшается величина расхода, для определения которого нужна поправка на вязкость (см. ниже).

Для измерения основных величин выбирают наибольшие допустимые значения h_p до 1000 мм рт. ст.

г) Расчет нестационарной диафрагмы для пара

Принимая $\varepsilon = 1$, определяют d , как показано выше. Затем по значению $m = \frac{d^2}{D^2}$ находят α (рис. 2-23) и ε (рис. 2-24), после чего по формуле (2-1) определяют окончательную величину G_p .

д) Расчет стационарной диафрагмы для пара

а) для выбранного значения h_p и некоторого среднего значения $\alpha m^\circ = 0,4$ определяют ε° (рис. 2-24) и по формуле (2-2) величину $\alpha m'$;

б) по $\alpha m'$ находят новое значение ε' (рис. 2-24), а затем $\alpha m'' = \alpha m' \frac{\varepsilon'}{\varepsilon^\circ}$; на этом можно остановиться, так как для $\alpha m''$ величина ε'' будет достаточно близка к ε' ;

в) находят α по $\alpha m''$ (рис. 2-23), а затем

$$m'' = \frac{\alpha m''}{\alpha} \text{ (до четырех знаков),}$$

$$d = D \sqrt{m''} \text{ (до четырех знаков);}$$

г) окончательный расход равен:

$$G_p = 0,04436 \varepsilon'' \alpha k_i^2 d^2 \sqrt{\gamma_p h_p}, \text{ или } G = A k_i^2 \varepsilon_p \sqrt{\gamma_p h_p}. \quad (2-3)$$

Полученная величина G_p должна мало отличаться (до $\pm 0,1\%$) от ранее принятого стандартного значения.

е) Поправка на вязкость

При расходах меньше некоторой минимальной величины ($G < G_{\min}$) в формулу (2-3) добавляется коэффициент вязкости ($k_v = 1 \div 1,04$) — см. [Л. 18]. Измерения в этой зоне расходов обычно не имеют практического значения, тем более, что и перепад в диафрагме весьма мал.

ж) Остаточная потеря давления в диафрагме

Остаточная потеря давления в диафрагме (измеряемая на расстоянии D перед диафрагмой и $6D$ после нее) составляет:

$$\Delta p' = (1 \div 1,1m) \Delta p \text{ [ата]}, \quad (2-4)$$

где

$$\Delta p = \frac{h}{797};$$

797 — столб ртути с противовесом равного столба воды при температуре 20°C , отвечающий давлению 1 кг/см^2 ($\frac{735,5 \cdot 13,5}{13,5 - 1}$).

з) Поправки к измеренному расходу

Ориентировочные поправки к измеренному расходу на отклонение $\pm 1 \text{ ата}$ и $\pm 1^\circ \text{C}$ от расчетных значений p и t для пара составят:

$$\Delta G_p \approx \pm \frac{1 \cdot 100}{2p_p} [\text{проц}/\text{ата}];$$

$$\Delta G_t \approx \mp \frac{1 \cdot 100}{2T_p} [\text{проц}/\text{град}].$$

Более точная поправка будет:

$$\Delta G_v = \frac{\gamma - \gamma_p}{2\gamma_p} \cdot 100 [\%],$$

где γ — удельный вес измеряемой среды при отклонении ее давления или температуры от расчетных значений.

Пример. Расчет стационарной дроссельной диафрагмы на свежем паре.

Задано:

$$G_p = 9000 \text{ кг/ч}; \quad p_p = 12 \text{ ата};$$

$$D_p = 150 \text{ мм}; \quad t_p = 300^\circ \text{C}.$$

$$\text{Принимаем: } G_p = 10\,000 \text{ кг/ч} \quad (\text{стр. 140})$$

$$h_p = 400 \text{ мм}.$$

$$\text{Находим: } \gamma_p = 4,582 \text{ кг/м}^3; \quad [\text{Л. 24}]$$

$$k_t^2 = 1,007; \quad (\text{табл. 2-4})$$

$$\frac{\Delta p}{p_p} = \frac{400}{797 \cdot 12} = 0,0417;$$

$$\varepsilon' \left(\text{для } am' = 0,4 \text{ и } \frac{\Delta p}{p_p} = 0,0417 \right) = 0,983 \text{ (рис. 2-24);}$$

$$am' = \frac{10\,000}{0,04436 \cdot 1,007 \cdot 0,983 \cdot 150^2 \sqrt{400 \cdot 4,582}} = 0,2364 \text{ [формула (2-2)]};$$

$$\varepsilon' \left(\text{для } am' = 0,2364 \text{ и } \frac{\Delta p}{p_p} = 0,0417 \right) = 0,985 \text{ (рис. 2-24);}$$

$$am'' = \frac{0,2364 \cdot 0,983}{0,985} = 0,2359;$$

$$\alpha \text{ (для } am'' = 0,2359 \text{ и } D = 150 \text{ мм)} = 0,6545 \text{ (рис. 2-23);}$$

$$m'' = \frac{0,2359}{0,6545} = 0,3605;$$

$$d = \sqrt{0,3605 \cdot 150^2} = 90,05 \text{ мм}.$$

Проверка расчета:

$$G = 0,04436 \cdot 0,985 \cdot 0,6545 \cdot 1,007 \cdot 90,05^2 \sqrt{400 \cdot 4,582} = 9999 \text{ кг/ч}.$$

Ошибка расчета:

$$\delta_G = \frac{9999 - 10\,000}{10\,000} \cdot 100 = -0,01 \%.$$

Минимальное значение расходов, определяемых без учета коэффициента вязкости:

$$\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{см/см}^2; \quad [\text{Л. 18}]$$

$$\text{Re} = 0,036 \cdot \frac{10\,000}{150 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 1\,200\,000; \quad [\text{Л. 18}]$$

$$\text{Re}_{\text{пред}} = 168\,000; \quad [\text{Л. 18}]$$

$$G_{\min} = 10\,000 \cdot \frac{168\,000}{1\,200\,000} = 1400 \text{ кг/ч}. \quad [\text{Л. 18}]$$

Остаточная потеря давления:

$$\Delta p' = (1 - 1,1 \cdot 0,3605) \cdot \frac{400}{797} = 0,30 \text{ ата. [формула (2-4)]}$$

" 19 г. Расчет по Правилам 27-54 составил: _____

Для построения вспомогательного графика $G_p = f(h_p)$ при $\gamma = \gamma_p$ (если это желательно) составляют таблицу для числового ряда значений $\sqrt{h} = 1; 2; 3$ (табл. 2-6).

Таблица 2-6

$\sqrt{h}$	1	2	3	4	5
h	1	4	9	16	25
ε^*					
$G = A\varepsilon\sqrt{\gamma h}$					

$$*\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_p) \frac{h}{h_p}$$

2. Погрешность измерения расхода диафрагмой

При измерениях расхода нормальной диафрагмой некоторые погрешности неизбежны даже в том случае, когда она полностью отвечает перечисленным требованиям. Причинами погрешностей являются неточность коэффициентов α и ε , а также ошибки измерения и отсчета величин h и γ (p и t) во время опыта.

Метод вычисления погрешности расхода см. в Правилах 27-54 [Л. 18].

Погрешность измерения расхода увеличивается с увеличением m , уменьшением D и увеличением $\Delta p/p$ — для пара, что видно из следующих величин средней квадратичной относительной погрешности:

а) погрешность $\pm \sigma_\alpha$ коэффициента расхода α , включая влияние шероховатости трубопровода и неостроты кромок диафрагмы (табл. 2-7):

Таблица 2-7

$m \backslash D$	50	100	200	300
0,1	1,73	1,13	0,7	0,5
0,4	1,95	1,39	0,78	0,51
0,7	2,74	2,32	1,79	1,48

б) погрешность $\pm \sigma_\varepsilon$ множителя ε (табл. 2-8).

Соответствующим выбором величин h_p и m и увеличением диаметра трубопровода D (см. рис. 2-19, в и г) можно достигнуть заданной величины погрешности измерения расхода нетарируемой диафрагмой.

Таблица 2-8

$\Delta p/p$	$\leq 0,01$	0,01—0,03	0,03—0,10	0,10—0,2	0,2
σ_ε	0	0,50	1,0	1,50	2,0

Точность измерения в опытах с пониженным расходом можно улучшить путем:

а) подключения расходомера поплавкового типа (ДП) со сменным стаканом минимальных размеров (h_1); тогда 100% шкалы отвечает меньшему перепаду h_1 и расходу

$$G_1 = A k_1^2 \varepsilon \sqrt{\gamma h_1};$$

б) использования воздушно-водяного дифманометра или заполнения его жидкостью с удельным весом больше единицы;

в) включения последовательно или параллельно (на обводе) установленной другой диафрагмы, рассчитанной на малый расход, либо замены одной диафрагмы другой;

г) надежного отключения одного из параллельных трубопроводов.

При отсутствии второй диафрагмы на измеряемом потоке дублирующий дифманометр присоединяют ко второй паре отверстий, которые сверлят в имеющейся диафрагме.

3. Проверка годности устройства для измерения расхода мерной диафрагмой

При пользовании диафрагмой необходимо убедиться в выполнении следующих условий:

1) составлены протоколы проверки и тарировки диафрагмы по приложениям 3-11 и 3-12; расхождение между данными большинства опытов не превосходит $\pm 0,5\%$; для нетарируемой диафрагмы расчетная величина погрешности достаточно мала; выполнены условия, перечисленные на стр. 131—133;

2) при максимальном расходе перепад в диафрагме составляет 400—1000 мм; при минимальном расходе — не менее 100 мм столба ртути или другой жидкости;

3) показания основных и дублирующих приборов совпадают (до $\pm 1\%$); дифманометр и соединительные трубки удовлетворяют требованиям, перечисленным на стр. 113—114;

4) остаточная потеря давления достаточно мала.

4. Тарировка диафрагмы по баку

Путем тарировки уточняют расчетный коэффициент расхода диафрагмы или общий коэффициент A в формуле (2-3).

Тарировка состоит из восьми опытов, повторяемых дважды при устойчивых расходах воды около 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 расчетного расхода G_p .

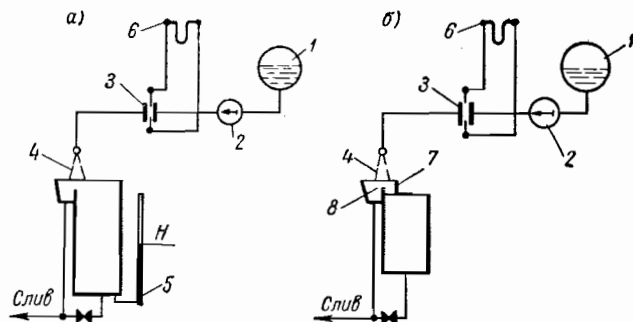


Рис. 2-25. Схема тарировки диафрагмы по мерному баку:

а — с водомерным стеклом; б — с горлом.

1 — конденсатор; 2 — насос; 3 — диафрагма; 4 — перекидная воронка; 5 — водомерное стекло; 6 — дифманометр, расходомер; 7 — горло бака; 8 — порог перелива.

Вода при температуре до 30°C подается через диафрагму в мерный бак по специальной схеме (рис. 2-25), исключающей приток или утечку воды между тарируемой диафрагмой и мерным баком, а также в самом баке (с открытым сливом для контроля).

Время опыта — с момента перевода перекидной воронки на бак и с бака на слив — по секундомеру должно быть не менее 120 сек, чтобы ошибка отсчета времени в 0,2 сек составила меньше 0,2%. Поэтому необходимая емкость

бака, заполняемого до горла, по схеме рис. 2-25, б определяется из выражения

$$G_6 \geq G_p \cdot \frac{120}{3600} \geq 0,033 G_p.$$

Ошибка в измерении линейкой недолива, т. е. разности между уровнями перелива и воды в горле в конце опыта, ничтожна вследствие его малого сечения.

В случае переполнения горла или при уровне воды ниже горла в момент окончания опыта его повторяют. Наибольшая ошибка имеет место при отсчете перепада по дифманометру в случае малых расходов. При частичном наполнении бака по схеме рис. 2-25, а изменение уровня в нем за опыт должно быть не менее 1000 мм, чтобы ошибка отсчета в 2 мм по водомерному стеклу (после достаточного успокоения уровня) была меньше 0,2%.

Результаты тарировки диафрагмы оформляют в виде графика $G = f(\sqrt{\gamma h})$ или $k_t = f(G)$ с таблицей замеренных величин и подсчетом действительных значений A или A , а также поправочного множителя k_t к их расчетным значениям (приложение 3-12).

На графике $G = f(\sqrt{\gamma h})$ опытные точки должны лежать на прямой, проходящей через начало координат с отклонениями до 0,5% ($A \approx \text{const}$ или $k_t \approx \text{const}$). Окончательное среднее значение величины A определяют по графику $G = f(\sqrt{\gamma h})$ или считают равным расчетному значению A_p , умноженному на поправочный множитель k_t :

$$A = k_t A_p;$$

величина A или k_t может быть принята непостоянной, если расположение опытных точек на графике $G = f(\sqrt{\gamma h})$ или $k_t = f(G)$ подтверждается достаточным числом опытов.

Во время тарировки диафрагм требуется быстрое пополнение конденсатора сырой или химически очищенной водой.

5. Тарировка бака

Бак, служащий для тарировки диафрагмы или для непосредственного измерения расхода воды, тарируют дважды путем наполнения его до перелива или опорожнения порциями воды посредством мерного бачка (с горлом) емкостью около 5% от емкости бака. Мерный бачок мон-

тируют выше или ниже бака и, в свою очередь, тарируют порциями воды, взвешенными на весах, или более мелкой посудой (до 10% емкости бачка) с горлом, емкость которой определена с точностью до 0,1%.

Более точный результат получают посредством взвешивания. Уравновесив (разновесом или мелкой монетой) каждый раз порожнюю посуду, наполняют ее сначала быстро, а затем медленно (например доливая из кружки) до появления равновесия с гирями одного веса. Допускается расхождение между данными двух тарировок бака не более 0,2%.

Бак должен быть цилиндрическим с жесткими днищем и крышкой. Высота и сечение горла бака (рис. 2-25, б) должны быть достаточными для выхода воздуха из бака, с учетом водоворота в конце наполнения во время тарировки диафрагмы. Для бака высотой 3 м и более наличие горла необязательно.

Эскиз установки бака по схеме рис. 2-25, б см. в приложении 3-3.

При тарировке бака по рис. 2-25, б определяется лишь полная его емкость до перелива, а по рис. 2-25, а после каждой порции воды фиксируют уровень и температуру воды в водомерном стекле по термометру, подвешенному на нити. Результаты его тарировки оформляют, как показано на рис. 2-26, с применением достаточно крупного масштаба.

Тарировку бака по рис. 2-25, б оформляют протоколом (см. приложение 3-12, а, б).

Следует заметить, что тарировка по схеме рис. 2-25, б проще и точнее.

Емкость бака V_t при температуре воды, отличающейся от ее значения во время тарировки, равна:

$$V_t = (1 + \alpha \Delta t)^3 V_T \approx (1 + 3\alpha \Delta t) V_T,$$

где V_T — емкость бака при температуре воды во время тарировки;

$\Delta t = t - t_T$ — разность между данной температурой воды и ее значением во время тарировки бака;

$\alpha = 0,000012$ — коэффициент линейного расширения стали.

При $\Delta = 10^\circ \text{C}$ имеем:

$$1 + 3\alpha \Delta t = 1,00004.$$

Применяемые в расчетах величины удельного веса воды и водяного пара берут из таблиц, где приведены их значения в пустоте на географической широте 45° и на уровне моря. Поэтому результаты взвешивания воды в воздухе при тарировке бака следует умножить на коэффициент 1,001, учитывающий вес вытесняемого водой воздуха. Кроме того, этот вес, как и табличные значения

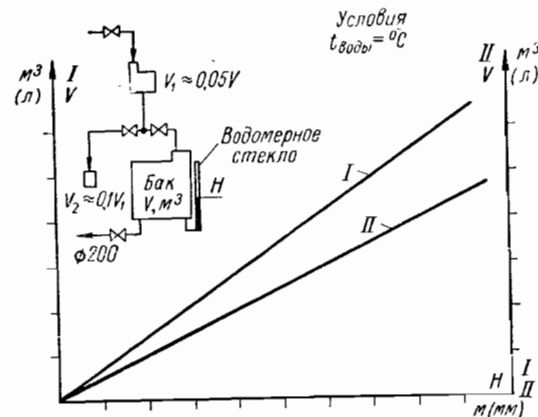


Рис. 2-26. Схема и график тарировки бака с водомерным стеклом.

удельных весов, требует поправки, равной $-0,03\%$ на $+1000 \text{ м}$ высоты и $-0,03\%$ на -10° отклонения широты места измерения от 45° . Этими поправками при их малости (меньше $0,1\%$) можно пренебречь.

2-8. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

1. Измерение расхода свежего пара, конденсата и питательной воды

Диафрагму (сопло) на свежем паре тарируют по диафрагме на конденсате путем проведения специальных опытов при расходах свежего пара 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0 максимального и при чисто конденсационном режиме работы (без отборов пара), либо с отбором, но при условиях (плотности подогревателей, тепловая схема), обеспечивающих равенство расходов пара и конденсата через диафрагмы.

Для установок с регулируемым отбором, где полный расход свежего пара намного больше максимального пропускания в конденсатор, рекомендуется [Л. 29, стр. 44] проводить два-три опыта с пониженным давлением пара перед диафрагмой так, чтобы перепад в ней составил 100, 80 и 60% расчетного при максимальном расходе пара в конденсатор. При этом увеличение перепада приблизительно пропорционально уменьшению давления пара, а температура пара перед стопорным клапаном, вследствие дросселирования, заметно понижается.

Полученное из опытов отношение расхода конденсата к расходу пара (за исключением явно ошибочных значений) принимают в качестве постоянного поправочного множителя k_t к расчетному коэффициенту расхода диафрагмы (сопла) на паре или к множителю A в формуле (2-3), пользуясь графиком $k_t = f(G)$ — см. выше.

Величина множителя k_t обычно отличается от единицы не более чем на $\pm 3\%$. Если расхождение между значениями k_t в отдельных опытах больше 1%, число опытов следует увеличить.

Тарировка диафрагмы на свежем паре тем более обязательна, если она не отвечает какому-либо из перечисленных требований Правил 27-54.

Все опыты проводят, соблюдая следующие условия:

а) исключение утечек и притоков пара, воды в тепловой схеме и в ее элементах между пунктами измерения расходов пара и конденсата (в конденсаторе, через неплотности арматуры);

б) исключение круговых потоков через диафрагму на конденсате (рециркуляции и пр.);

в) измерение накопления или убыли конденсата во всех емкостях (в конденсаторе, подогревателях и др.); уровень в конденсаторе в конце опыта должен быть доведен до его значения в начале опыта, чем определяются моменты подачи соответствующих сигналов; желательно, чтобы этот уровень был не выше конденсатоотводчика, т. е. в пределах малой поверхности зеркала воды;

г) измерение или определение неизбежных небольших утечек пара, воды (через вестовые трубы уплотнений, с отсосом воздуха из конденсатора, через сальники конденсатного и сливного насосов, присоса сырой воды в конденсатор — по химическому анализу конденсата на холостом ходу и т. п.);

д) постоянство расхода конденсата или перепада по дифманометру во время опытов; перепад по дифманометру должен быть не менее 100 мм;

е) выполнение тарировки диафрагмы на конденсате по мерному баку;

ж) тарировка конденсатора в пределах возможной разности уровней в начале и в конце опыта.

Небольшие емкости правильной формы (подогреватели) определяют по их геометрическим размерам.

Тарировку конденсатора производят путем слива или откачки насосом воды в мерный бачок с отметкой уровня по водомерному стеклу после слива каждого бачка. Перед началом слива следует убедиться в неизменности уровня в течение 30 мин.

Малые расходы конденсата измеряют периодически баком или по приросту уровня в водомерном стекле (конденсатора, подогревателя), по диафрагме — при откачке со значительным равномерным расходом, с отсчетом времени по секундомеру и с учетом продолжительности опыта во всех случаях.

Расход пара, удаляемого с воздухом из конденсатора, обычно меньше 20 кг/ч и при паровом эжекторе может быть подсчитан по формуле (2-9), а при водяном эжекторе — из уравнения теплового баланса с измерением температуры и расхода воды.

Утечку пара через вестовую трубу оценивают в 30 кг/ч.

При ничтожном влиянии промежуточных емкостей и устойчивых значениях измеряемых величин — перепада давления и параметров пара, воды у диафрагм — продолжительность опыта можно ограничить 15 мин.

В измерении расхода конденсата тарированной диафрагмой возможны ошибки из-за неточного отсчета перепада в дифманометре вследствие неравномерной подачи конденсатного насоса и пульсации ртути в дифманометре, неучтенных протечек воды и накоплений в емкостях. Величину этих ошибок надо сводить к минимуму.

Во время испытания установки с включенными отборами расход свежего пара при фиксированном парораспределении отличается большей устойчивостью, чем расход конденсата, и его следует определять по паровой диафрагме с учетом множителя k_t . Измерение конденсата во всех опытах с отборами пара служит для определения регенеративных отборов пара из уравнений теплового

баланса и для контроля расхода свежего пара. Небольшие расходы конденсата — до 30—40 $m^3/ч$, например в опыте при холостом ходе крупной установки, измеряют непосредственно мерным баком с последующим сливом конденсата (при этом допускается рециркуляция конденсата через паровой эжектор).

Система из двух баков с возвратом всего конденсата во время опытов в испытательную схему [Л. 31, стр. 42] сложна и применяется редко, лишь при весьма ответственных испытаниях.

Диафрагму на производственном отборе пара (D_n) можно тарировать по диафрагме на свежем паре (D_1) при режиме с минимальным расходом в конденсатор и отключенных всех других отборах пара. В этом случае

$$D_n = D_1 - G_k,$$

где G_k — расход конденсата (включая расход из холодильника эжектора и т. п.), измеряемый баком.

Расход питательной воды, имеющей высокие давление и температуру, измеряют только диафрагмой. Следует заметить, что измерение нетарированной диафрагмой расхода воды точнее, чем измерение расхода пара, поскольку ошибки измерения давления и температуры меньше влияют на ее удельный вес, а также отсутствует погрешность за счет множителя ϵ .

2. Измерение расхода отборного пара

Расход отборного пара можно измерять диафрагмой, но при малом перепаде давления $\Delta p = 0,05 : 0,1 p$, так как остаточная потеря давления приводит к повышению давления в камере регулируемого отбора или к уменьшению нагрева конденсата в подогревателе.

С уменьшением нагрузки турбины давление и удельный вес пара нерегулируемого отбора падают одновременно с его расходом, так что перепад в диафрагме относительно мало изменяется.

Диафрагму на дренаже из теплообменников применяют лишь, когда температура его после диафрагмы меньше температуры кипения, т. е. обычно после сливного (перекачивающего) насоса, однако из-за резких колебаний подачи насоса это измерение может оказаться ненадежным.

Измерение расхода дренажа баками точнее, но допустимо при температуре до 65° С.

Учитывая трудности измерения расхода пара на подогреватели и его дренажа, а также и то, что температура конденсата за подогревателями является одной из основных характеристик установки, следует считать расход пара на подогреватели величиной производной и определять его из уравнения теплового баланса (см. § 5-2).

Расход пара на деаэраторы 6 и 1,2 atm из регулируемых отборов измеряют общей диафрагмой на линиях отбора или отдельной диафрагмой.

Расход пара на деаэратор 1,2 atm во время испытания обычно исключают, вследствие трудностей измерения: большой диаметр трубы, влажное состояние пара, малый допустимый перепад давления. При этом необходимо убедиться в отсутствии протечки пара через неплотности задвижек.

В ряде случаев расход пара D^T регулируемого отбора при давлении меньше 2 atm определяют из уравнения весового баланса установки (рис. 2-27):

$$D^T = D_1 - \sum D_{отб} - G_k.$$

Такой метод определения, особенно при малой относительно D_1 величине D^T , является наименее точным. Ему следует предпочесть измерение расхода конденсата из бойлеров, где это возможно, при условии надежного контроля их плотности.

3. Измерение расхода охлаждающей воды на конденсатор

Расход охлаждающей воды W [$m^3/ч$ или $m^3/ч$] на конденсатор можно измерять диафрагмой с малым перепадом давления, вследствие малого располагаемого напора, но обычно его определяют из уравнения теплового баланса конденсатора:

$$W(t_{в2} - t_{в1}) = D^k(i_2 - i_k) + Q_{сл}, \quad (2-5)$$

где $Q_{сл}$ — тепло, отдаваемое в конденсаторе сливом дренажа из ПНД и эжектора, в 10³ $ккал/ч$ (весьма малая величина).

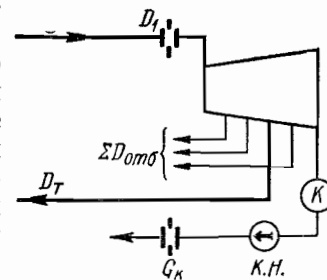


Рис. 2-27. Схема определения расхода пара регулируемого отбора из уравнения весового баланса установки.

Измерению и определению подлежат расход пара в конденсатор D^k [м/ч], теплосодержание пара i_2 и конденсата i_k , температура охлаждающей воды на входе и выходе $t_{в1}$ и $t_{в2}$, требующая особенно точного измерения.

При $\Delta t = t_{в2} - t_{в1} = 15^\circ \text{C}$ ошибка $\pm 0,2^\circ \text{C}$ в измерении величин $t_{в1}$ и $t_{в2}$ вызывает ошибку в расходе воды:

$$\delta_w = \frac{(0,2 + 0,2) \cdot 100}{15} = 2,7\%.$$

Чем больше разность $\Delta t_{в}$, тем меньше влияние ошибки ее измерения.

Погрешность измерения расхода охлаждающей воды до $\pm 3\%$ можно считать допустимой.

Определение величин D^k и i_2 приведено в § 5-2.

4. Измерение расхода пара на уплотнения, эжектор и др.

Расход пара на концевые уплотнения (а также пара, отсасываемого из уплотнений вала и штоков клапанов) подлежит специальному измерению, как значительная составляющая потеря и при том подверженная изменению в процессе эксплуатации. Ее величина достигает 2—3% расхода свежего пара на установку. Расход на уплотнения измеряют диафрагмой обычным путем. На линиях отсоса пара из уплотнений перепад давления в диафрагме ограничивают величиной

$$0,1 - 0,15 p.$$

При этих измерениях допустима сокращенная длина прямого участка трубопровода l_1 (рис. 2-20, е), с учетом дополнительной погрешности измерения в 1—2%, а также установка бескамерной диафрагмы. При необходимости монтируют новый прямолинейный участок трубопровода.

Расход пара на эжектор определяют по размеру горла паровых сопел и параметрам пара перед ними по формуле

$$D_1^3 = 0,57 d^2 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ [кг/ч]},$$

или

$$D_1^3 = 8,6 d^2 p_1 \sqrt{\frac{i}{T_1}} \text{ [кг/ч]}, \quad (2-6)$$

где D_1^3 — расход пара через одно сопло, на одну ступень;
 d — диаметр горла сопла, мм;
 p_1 ; v_1 ; T_1 — давление, удельный объем и абсолютная температура пара перед соплом [кг/см²; м³/кг; °K].

Мелкие утечки пара измеряют периодически путем его отвода и конденсации в змеевике или смешением в сосуде с водой известной емкости.

Измерение расхода пара на уплотнения, эжектор и др. необходимо для составления весового баланса пара в прочной части и определения ее внутреннего относительного к. п. д. (см. § 5-2).

5. Измерение расхода воздуха и пара, отсасываемого паровым эжектором из конденсатора

На выхлопе эжектора устанавливают диафрагму (рис. 2-28) для измерения расхода паро-воздушной смеси. Расход этой смеси определяют по упрощенной формуле

$$G_{см} = 0,04436 \cdot 0,6 d^2 \sqrt{\gamma_{см} h} = 0,027 d^2 \sqrt{\gamma_{см} h} \text{ [кг/ч]}.$$

Так как объем воздуха и смеси один и тот же, то вес отсасываемого воздуха равен:

$$G_{в} = G_{см} \frac{\gamma_{в}}{\gamma_{см}}.$$

В табл. 2-9 приведены значения $\gamma_{в}/\gamma_{см}$ в зависимости от температуры смеси при ее давлении, принятом равным $p_{см} = 1 \text{ атм}$.

Входящие в табл. 2-9 величины определяются следующим образом: $p_{п}$ и $\gamma_{п}$ — по таблицам [Л. 24]; $p_{в} = 1 - p_{п}$;

$$\gamma_{в} = \frac{1,293}{1,033} p_{в} \frac{273}{273 + t_{см}}; \quad \gamma_{см} = \gamma_{п} + \gamma_{в}.$$

При обычной температуре смеси на выхлопе $t_{см} = 60^\circ \text{C}$

$$G_{в} = 0,86 G_{см},$$

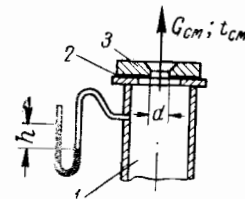


Рис. 2-28. Схема измерения расхода воздуха, отсасываемого эжектором.

1 — выхлоп эжектора; 2 — прокладка; 3 — измерительная диафрагма.

Таблица 2-9

Температура паро-воздушной смеси $t_{см}$, °C	Парциальное давление пара $p_{п}$, ата	Удельный вес пара $\gamma_{п}$, кг/м³	Парциальное давление воздуха $p_{в}$, ата	Удельный вес воздуха $\gamma_{в}$, кг/м³	Отношение $\gamma_{в}/\gamma_{см}$
90	0,715	0,42	0,285	0,27	0,39
80	0,483	0,290	0,517	0,50	0,64
70	0,318	0,200	0,682	0,68	0,77
60	0,203	0,130	0,797	0,82	0,86
50	0,126	0,083	0,874	0,93	0,92
40	0,075	0,051	0,925	1,00	0,95

или

$$G_{в} = 0,86 \cdot 0,027 d^2 \sqrt{0,95 h_{рт} \frac{13,6}{12,6}} = 0,024 d^2 \sqrt{h_{рт}} \text{ [кг/ч]}, \quad (2-7)$$

либо

$$G_{в} = 0,0065 d^2 \sqrt{h_{в}} \text{ [кг/ч]}, \quad (2-8)$$

где $h_{в}$ — мм вод. ст.

На основании формул (2-7) и (2-8) построены кривые рис. 2-29. Простота пользования ими вполне оправдывает их некоторую неточность (до 5%), не имеющую практического значения.

Расход пара, удаляемого эжектором, равен:

$$G_{п} = G_{см} - G_{в};$$

при $t_{см} = 60^\circ \text{C}$ имеем:

$$G_{п} = 0,14 G_{в}.$$

Расход пара, отсасываемого с воздухом из конденсатора, определяется по формуле

$$G_{пара} = 0,62 \frac{p_{п}}{p_{см} - p_{в}} G_{в} \text{ [кг/ч]}, \quad (2-9)$$

где $G_{в}$ — по формулам (2-7), (2-8), кг/ч; $p_{п}$ — давление насыщения для $t_{см}$ по [Л. 24], ата;

$$p_{в} = p_{см} - p_{п} \text{ [ата]}.$$

При этом требуется точное измерение давления и температуры (голым термометром) паро-воздушной смеси непосредственно на выходе из конденсатора.

Поправочный коэффициент k
на температуру паро-воздушной смеси $t_{см}$

$t_{см}$, °C	40	60	80
k	1,11	1,0	0,74

$$G'_{возд} = k G_{возд}$$

$$G_{норм} = \dots \text{ кг/ч}$$

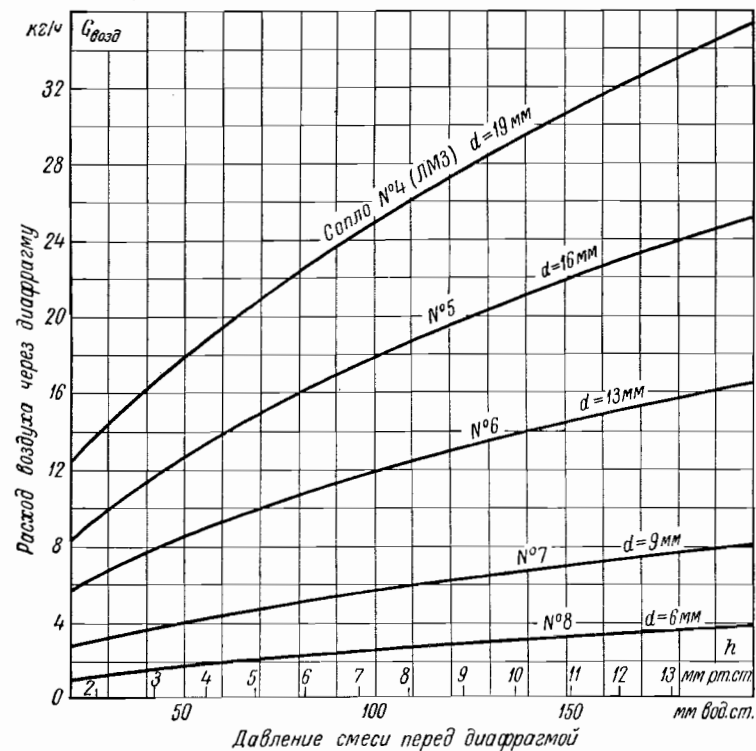
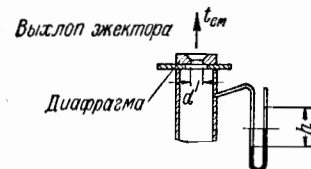


Рис. 2-29. Расход воздуха, отсасываемого паровым эжектором, в зависимости от давления перед диафрагмой на выходе и диаметра диафрагмы.

2-9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА И ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ И ПАРА

Удельный вес и теплосодержание воды и перегретого пара измеряют косвенным путем, т. е. определяют в зависимости от измеренных величин p и t по таблицам [Л. 24] или по вспомогательным графикам $\gamma = f(p; t)$, построенным по данным этих таблиц в нужных пределах и в большом масштабе (см. рис. 5-1 — для пара, приложение III — для воды).

При определении теплосодержания пара (заторможенного потока) полагают, что его скоростная энергия в значительной мере учитывается повышением температуры, вследствие торможения потока у измерительной гильзы (см. § 2-5).

Наиболее надежным методом определения теплосодержания влажного пара является дросселирование до перегретого состояния или конденсация всего потока пара. В первом случае необходимо точное измерение его параметров p и t до и после дросселирования; во втором — измерение расхода и температуры конденсата пара и охлаждающей воды для решения уравнения теплового баланса конденсатора.

При измерении части потока неизбежна ошибка от неточности «пробы» пара из-за неравномерного распределения воды в потоке и частичного ее выпадения на стенки паропровода.

Теплосодержание влажного пара на выходе практически определяют из баланса мощности всей установки (см. § 5-2).

2-10. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В СОСУДЕ

Уровень воды в сосуде: конденсаторе, подогревателе, баке измеряют по миллиметровой шкале у водомерного стекла.

Правильное выполнение устройства отвечает следующим условиям:

а) стекло непосредственно присоединено к сосуду короткими трубками достаточного диаметра во избежание запаздывания уровня в стекле; соединительные линии и сопряжения их со стеклом герметичны;

б) стекло чистое; вода в стекле без воздушных пузырей;

в) шкала миллиметровая, четкая, хорошо закреплена и освещена, удобна для отсчета; длина стекла и шкалы — достаточна;

г) на стекле или на шкале имеются метки (движки) для фиксации уровня в начале и в конце отсчетов;

д) уровень в стекле слегка колеблется («дышит»); соединительные краны открыты и не засорены;

е) емкость сосуда в пределах высоты стекла протарирована или известна;

ж) имеется эскиз, фиксирующий расположение стекла по отношению к сосуду, к трубному пучку.

2-11. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЧИСЛА ОБОРОТОВ ТУРБИНЫ

Перемещения элементов регулирования и парораспределения производят по эксплуатационным или специально изготовленным четким миллиметровым шкалам с острыми стрелками. Для перемещений в пределах 10—20 мм применяют стрелки с неравноплечим рычагом, а до 10 мм — станочный индикатор.

При динамических испытаниях регулирования, связанных со значительными и внезапными изменениями нагрузки установки, необходимы специальные устройства для автоматической записи перемещений. В качестве таких устройств обычно применяют различного типа преобразователи механических перемещений в электрические величины и осциллограф, используемые также для одновременной записи других величин, например давления масла в системе регулирования, электрической мощности и числа оборотов турбины [Л. 22].

Во время теплового испытания установки число оборотов турбины изменяется незначительно (до $\pm 0,5\%$), в пределах колебаний частоты тока в сети, и потому не нуждается в специальных измерениях.

При снятии кривой выбега турбины число оборотов измеряют ручным тахометром, а при статическом испытании регулирования применяют также стрелочный частотмер или узкопредельный тахограф с записью изменения числа оборотов в нужных пределах.

Изменения числа оборотов при испытаниях регулирования со сбросом электрической нагрузки и отключением генератора от сети записываются осциллографом, как сказано выше.

2-12. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Измерение электрической мощности не входит в круг теплотехнических измерений, и поэтому здесь приводятся лишь некоторые общие указания.

Измерения мощности производят точными счетчиками и ваттметрами класса 0,2—0,5, присоединяемыми к специальным измерительным трансформаторам тока и напряжения по схеме, предусмотренной программой испытания.

Погрешности и поправки приборов и трансформаторов по паспорту и по результатам проверки должны быть в пределах класса и учтены при обработке опытных данных.

Посторонние включения и вредные влияния на точность измерения должны быть совершенно исключены. Расхождения в показаниях основных и дублирующих приборов должны находиться в пределах класса точности приборов; практически они значительно меньше. (Погрешность эксплуатационного электросчетчика класса 2,5 часто не превышает 0,5%).

Показания электросчетчика можно отмечать по двум секундомерам: по одному — в начале и в конце опыта, по другому — через 10—15 мин, причем отсчет времени для эксплуатационного счетчика производят в момент появления целой цифры.

Лабораторный счетчик включают и отключают по сигналам начала и конца опыта с одновременным отсчетом времени по секундомеру. Показания ваттметров записывают через 1—2 мин, вольтметра и амперметров — через 5 мин.

Для точного измерения мощности и энергии на зажимах генератора рекомендуется:

1) применять схему с тремя однофазными ваттметрами и счетчиками класса 0,2—0,5 (см. приложение 3-4); в трехпроводной сети с надежно изолированной нейтралью допускается схема измерения с двумя ваттметрами и счетчиками или с трехфазными ваттметром и счетчиком;

2) принимать меры, сводящие погрешности измерительных трансформаторов к минимуму (ввиду сложности учета этих погрешностей):

а) выбирать измерительные трансформаторы с фактической погрешностью в рабочих пределах измерений до $\pm (0,1 \div 0,2)\%$;

б) догружать трансформаторы напряжения (ТН) до номинала или до величины, при которой их погрешности не превышают 0,2% (по протоколу тарировки); догрузку

производить ламповым реостатом или набором постоянных активных сопротивлений, подключенных непосредственно к выходным зажимам предохранителей вторичной цепи;

в) уменьшать сопротивление вторичных цепей трансформаторов тока (ТТ) до величины, при которой их погрешности не превышают 0,2% (по протоколу тарировки);

3) предусматривать, чтобы суммарная потеря напряжения $\left(\sum \frac{IR^2}{U} \cdot 100\% \right)$ в цепях: зажимы генератора — ТН —

зажимы измерительных приборов не превышала 0,05%; обеспечить достаточно малое сопротивление проводов;

4) включением необходимых пределов по току обеспечивать показания ваттметров выше $\frac{1}{3}$ шкалы.

Средняя за опыт мощность генератора по показаниям трех ваттметров (W_1 ; W_2 ; W_3) и трех счетчиков (Z_1 ; Z_2 ; Z_3) определяется из выражений:

для ваттметров

$$N_{cp} = k_{тр} \beta_v (W_1 + W_2 + W_3)_{cp} : 10^3 \text{ [квт]},$$

для счетчиков

$$N_{cp} = k_{тр} \beta_{сч} (Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot \frac{3600}{t},$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трансформации при включенных пределах ТН и ТТ (например $k_{тр} = \frac{6000}{100} \times \frac{3000}{5} = 36\,000$);

β_v — постоянная ваттметров, равная произведению включенных пределов по току и напряжению у ваттметров, деленному на предел шкалы (например $\beta_v = \frac{5 \text{ а} \cdot 150 \text{ в}}{150 \text{ дел}} = 5 \text{ вт/дел}$);

$\beta_{сч}$ — постоянная счетчика (квт·ч или вт·ч на один оборот диска) по паспорту, для включенных пределов тока и напряжения;

Z_1 ; Z_2 ; Z_3 — разность показаний счетчика в конце и в начале периода измерения;

t — период измерения в секундах.

В отчете об электрических измерениях следует указать средние для каждого опыта значения величины тока, напряжения, частоты и $\cos \phi$, а также возможную погрешность измерения мощности генератора.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПОДГОТОВКА К ИСПЫТАНИЮ

3-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

С испытанием паротурбинной установки обычно связаны временные изменения тепловой схемы и режима нагрузки всей станции на сроки, заранее согласованные с диспетчерской службой (ДС) и с плановым отделом энергосистемы. Поэтому необходимо обеспечить выполнение экспериментальной части испытания точно в назначенный срок, тем более, что техническое состояние установки и многочисленных измерительных устройств монтируемых для испытания, с течением времени ухудшается.

Подготовка к испытанию состоит из четырех элементов:

- 1) ознакомления с установкой;
- 2) составления программы испытания;
- 3) подготовки установки к испытанию;
- 4) организационно-технической части.

3-2. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С УСТАНОВКОЙ

Для ознакомления с установкой необходимо:

- а) изучить технические условия на поставку и проектные данные завода-изготовителя, паспорт, акты ревизий, журналы дефектов, данные промышленных испытаний, эксплуатационные данные, нормы и инструкции;
- б) расспросить эксплуатационный персонал станции о произведенных и намечаемых изменениях технической характеристики и условий работы установки;
- в) осмотреть основные элементы установки во время ревизии;
- г) проверить работу установки при предельных режимах нагрузки; записать показания всех измерительных приборов при паровой нагрузке турбины (и каждой части —

ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.), равной $D_{\text{мин}}$, $D_{\text{макс}}$ и $D_{\text{эк}}$, имея в виду, что показания непроверенных эксплуатационных приборов могут быть неправильными;

д) наметить способ измерения электрической мощности, расходов пара и конденсата, места установки новых первичных измерительных приборов (трансформаторов, гильз, штуцеров, диафрагм);

е) проверить возможность поддержания устойчивых режимов нагрузки и условий работы установки (расходов и параметров пара — свежего и регулируемых отборов, расходов конденсата, питательной воды и др.), необходимых во время испытания.

В результате тщательного ознакомления требуется:

а) составить четкое заключение о целесообразном объеме, характере и сроке испытания. Испытание следует проводить вскоре после ревизии установки, с учетом графика электрической и тепловой нагрузок;

б) разработать и согласовать с ТЭС программу испытания с приложениями (см. приложения 3-1 — 3-6); отметить наиболее сложные из подготовительных работ;

в) составить техническую характеристику установки (см. приложение 3-7);

г) построить (получить) графики тепловых характеристик установки по данным: эксплуатационным, проектным, прошлых испытаний (или по соответствующим данным для аналогичной установки) — см. приложение 3-8. Составить перечень дефектов в состоянии и в работе основных элементов установки как в отношении экономичности (см. § 1-3 и приложение 3-19), так и с точки зрения надежности и удобства обслуживания;

д) записать по месту размеры, состояние и расположение имеющихся измерительных устройств, пригодных в качестве основных или дублирующих (в том числе диаметр горла у сопел эжектора), а также необходимые новые сверления, бобышки и др. (см. приложение 3-9).

Кроме полной тепловой схемы испытываемой установки (см. приложение 3-2), включая бойлерную, в случае возврата конденсата в схему желательно иметь подробную общестанционную схему паропроводов, питательных и конденсатных линий с указанием котлов, редукционно-увлажнительной установки (РОУ), деаэраторов, бойлерных установок, питательных, конденсатных и циркуляционных насосов. Такая схема помогает уяснить взаимосвязь

всех ее элементов с испытываемой установкой и решить ряд вопросов, относящихся к организации измерений расходов конденсата, обеспечению требуемых условий и режимов работы, выявлению и устранению всевозможных эксплуатационных затруднений при подготовке и проведении испытания.

3-3. СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЯ

Программа испытания определяет объем и характер всех работ и является основным техническим документом.

Программа испытания содержит следующие разделы:

- 1) цель испытания;
- 2) условия работы установки во время испытания;
- 3) режимы нагрузки;
- 4) методы измерений.

Приложениями к программе являются тепловая и электрическая схемы, а также перечни подготовительных работ (с эскизами) и точек измерений.

Все разделы программы должны быть изложены четко и подробно, чтобы исключить возможность различного их толкования.

Пример программы испытания для установки типа ВПТ-25 приведен в приложении 3-1.

1. Цель испытания

В этом разделе программы указывают те данные или характеристики, которые должны быть получены в результате испытания, и соответствующие условия работы установки — условия характеристики.

Объем тепловых характеристик, установленный Техническим отделом МЭС [Л. 25], следует дополнить характеристикой к. п. д. проточной части $\eta_{\text{во}} = f(D_1)$.

Условия характеристики по согласованию с ТЭС определяют в соответствии с гарантиями, проектными, фактическими или другими условиями работы, включая все факторы, которые существенны для экономичности установки:

а) давление и температуру свежего пара перед стопорным клапаном;

б) давление выхлопа и в камерах регулируемых отборов;

в) температуру питательной воды и конденсата за подогревателями и их расход;

г) тепловую схему установки, с указанием места ввода потоков конденсата отборного пара в схему турбины и их температуры;

д) техническую характеристику и исправное состояние установки (отсутствие недостатков, перечисленных в § 1-3); число часов работы после монтажа (в пределах до 300 час — в зависимости от интенсивности загрязнения проточной части), после промывки проточной части (до 24 час — при необходимости промывки), после чистки конденсатора (до 24 час — в зависимости от интенсивности загрязнения);

е) к. п. д. генератора, напряжение, способ охлаждения и cos ϕ ;

ж) границы тепловой характеристики по нагрузке установки — максимум и минимум.

Отдельно для конденсационного устройства указывают расход охлаждающей воды и ее температуру (в период испытания), воздушную плотность — присос воздуха (в кг/ч).

2. Условия работы установки во время испытания

Условия работы установки во время опытов те же, что и условия характеристики. Отклонения от них допустимы в пределах норм [Л. 31]:

Давление пара перед стопорным клапаном	$\pm 5\%$
Температура пара перед стопорным клапаном	$\pm 10^\circ \text{C}$
Давление выхлопа и в регулируемом отборе	$\pm 5\%$
» в конденсаторе	$\pm 10\%$
Расход пара регулируемого отбора	$\pm 7\%$
» конденсата и питательной воды	$\pm 5\%$

Отклонения должны быть постепенными для возможности точного измерения величин.

При полном соблюдении условий характеристики сокращается объем обработки опытных данных, повышается точность результатов испытания.

К моменту начала испытания установка должна находиться под нагрузкой в течение не менее 8 час и достигнуть устойчивого теплового состояния: в течение последних 15 мин перед опытом не наблюдается непрерывного повышения или понижения расхода и параметров пара (све-

жего, в отборах), конденсата, охлаждающей воды. Этим, а также временем, необходимым для перехода с одного режима на другой и для отдыха наблюдателей, определяются промежутки между опытами (от 20 мин до 1 часа).

Длительность одного опыта составляет 1 час, а при устойчивом режиме, незначительных промежуточных емкостях и малой тепловой инерции установки — от 0,5 до 1 часа.

Должен быть указан способ выполнения условий работы и соблюдения режимов нагрузки установки во время опытов. Например, поддержание повышенного давления в котельной и регулирование давления перед стопорным клапаном — посредством главной паровой задвижки или задвижки до паровой диафрагмы.

3. Режимы нагрузки

а) Основные опыты

Тепловые характеристики получают путем графического соединения опытных точек на основе интерполяции. Поэтому количество опытов и режимы нагрузки зависят от ожидаемой формы характеристики $D_1 = f(N_3)$, т. е. от системы парораспределения.

Ниже приведено примерное количество опытов для установок с различным парораспределением без регулируемых отборов.

1) для турбины с чисто дроссельным парораспределением (прямолинейная характеристика) — минимум два опыта: $N_{э макс}$ и $\sim 0,3N_{э макс}$. Однако для большей надежности и для полноты данной характеристики, а также характеристик основных элементов установки проводят не менее 7 опытов, в том числе по 2 опыта при крайних режимах нагрузки (рис. 3-1, а); опыт при холостом ходе нужен для оценки потерь холостого хода;

2) для турбины с дроссельным парораспределением и с одним обводом — 10 опытов (рис. 3-1, б);

3) для турбины с дроссельными парораспределениями и с двумя обводами пара — 13 опытов (рис. 3-1, в);

4) для турбины с сопловым парораспределением ожидаемая характеристика $D_1 = f(N_3)$ представляет собой волнистую кривую с числом волн, равным числу клапанов; число опытов определяется по рис. 3-1, г.

Для турбины с регулируемыми отборами характеристика по расходу пара представляет собой диаграмму режимов. В этом более сложном случае число опытов и режимы нагрузки определяются необходимостью получения характеристик $N = f(D_1)$ отдельно для каждой части — ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. с учетом пп. 1—4.

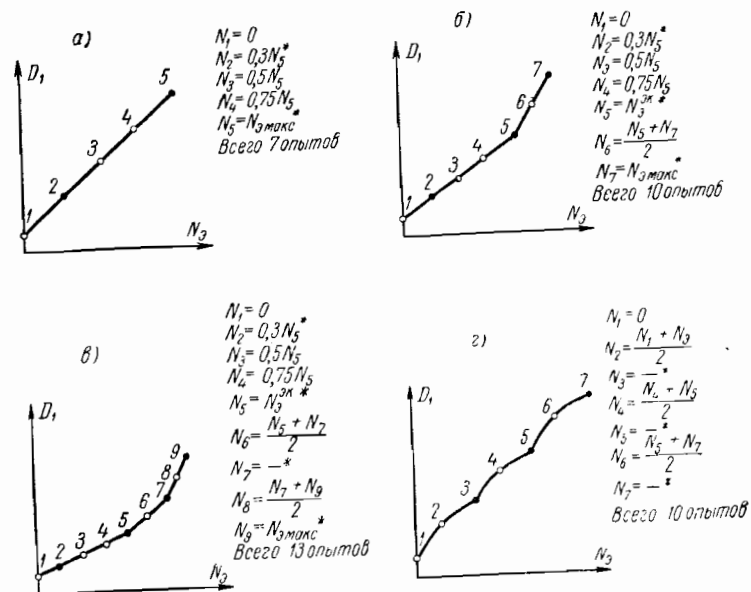


Рис. 3-1. Режимы нагрузки при испытании паротурбинной установки без регулируемых отборов пара: а — при чисто дроссельном парораспределении; б — при дроссельном парораспределении с одним обводом пара; в — при дроссельном парораспределении с двумя обводами пара; г — при сопловом парораспределении; * — два опыта.

В соответствии с общепринятой методикой (см. ниже) режимы нагрузок задают открытием органов парораспределения — сервомоторов ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д., а расходы пара и мощность установки указывают ориентировочно.

Общая характеристика опытов и их назначение могут быть представлены в виде табл. 3-1 (см. также приложение 3-1).

Во время опытов с минимальным открытием парораспределения ч. н. д. проверяется величина минимального

Таблица 3-1

Характеристика опытов	Назначение опытов
1. Ряд опытов при ходе сервомоторов ч. в. д. и ч. с. д. — $z^{ч. в. д.}$ и $z^{ч. с. д.}$ от максимума до минимума, значительном отборе D_p и минимальном ходе сервомотора ч. н. д. — $z^{ч. н. д.}_{мин}$ 2. Повторение двух опытов: а) при $z^{ч. в. д.}_{макс}$ и $z^{ч. с. д.}_{макс}$ б) при $\sim 0,5 z^{ч. в. д.}_{макс}$ и $\sim 0,5 z^{ч. с. д.}_{макс}$ и при $p_{п макс}$ вместо $p_{пх}$ 3. Повторение тех же двух опытов при $p_{пх}$, но $p_{т макс}$ вместо $p_{тх}$	Получение характеристики $N = f(D_1)$ ч. в. д. и ч. с. д. и определение поправки на давление p_p и p_t в камерах регулируемых отборов
4. Ряд опытов при ходе сервомотора ч. н. д. — $z^{ч. н. д.}$ от максимума до минимума при $z^{ч. в. д.} = const$; $z^{ч. с. д.}_{макс}$; $p_p \approx p_{п макс}$; $p_{тх}$ Все отборы пара из ч. в. д. и ч. с. д. (кроме теплофикационного) отключены 5. Повторение двух опытов: а) при $z^{ч. н. д.}_{макс}$ б) при $\sim 0,5 z^{ч. н. д.}_{макс}$ и при $p_{т макс}$ вместо $p_{тх}$	Получение характеристики $N = f(D_1)$ ч. н. д. и определение поправки на давление p_t в камере теплофикационного отбора

пропуска пара в конденсатор и нагрев ч. н. д., а также возможность продолжительной работы при этом режиме. Для надежного измерения температуры пара за ч. в. д. и ч. с. д., если оно не производится в самой проточной части, отбор за ними должен быть достаточно велик — около 50% расхода на входе в данную часть [Л. 29], а состояние пара — перегретым. Вследствие неодинаковой температуры в потоке при неполном открытии паровпускных клапанов измерение действительной средней температуры пара на выходе из ч. в. д. при таких режимах связано с дополнительными ошибками, которые тем меньше, чем больше точек измерений в сечении всего потока.

Если на выходе из ч. в. д. или из ч. с. д. (при двух регулируемых отборах) пар перегрет, то внутреннюю мощность этих частей определяют из выражения

$$N = \frac{\sum D h_{и}}{860},$$

а мощность ч. н. д. с влажным паром на выходе — из уравнения баланса мощности всей установки:

$$N^{ч. н. д.} = N_{э} + \Delta N_{эм} - N^{ч. в. д.} - N^{ч. с. д.}$$

Если же пар перед ч. н. д. влажный, данные для характеристики $N = f(D_1)$ ч. в. д. и ч. с. д. (при двух регулируемых отборах) получают из опытов при минимальном пропуске пара в ч. н. д. (метод ОРГРЭС). При этом мощность ч. в. д. и ч. с. д. определяют из следующих выражений: при одном регулируемом отборе

$$N^{ч. в. д.} = N_{э} + \Delta N_{эм} - N^{ч. н. д.}_{мин};$$

при двух регулируемых отборах

$$N^{ч. с. д.} = N_{э} + \Delta N_{эм} - N^{ч. в. д.} - N^{ч. н. д.}_{мин}.$$

Величину $N^{ч. н. д.}_{мин}$ (с учетом поправок на параметры пара перед ч. н. д. и давление на выходе из ч. н. д.) определяют по данным специального опыта: при пониженном расходе свежего пара, без отборов из ч. в. д. и ч. с. д., полном открытии парораспределения ч. в. д., сниженном давлении и наибольшей температуре пара перед стопорным клапаном (для достижения перегретого состояния пара перед ч. н. д.); расход пара из отбора перед ч. н. д. составляет около 30% номинального значения или равен нулю при измерении температуры пара в четырех-шести точках в камере отбора.

Учитывая незначительную величину $N^{ч. н. д.}_{мин}$, погрешность из-за неточности ее определения окажется допустимой и в случае оценки ее по проектным данным.

Опыты для получения характеристики $N = f(D_1)$ ч. н. д. проводят при неизменном расходе свежего пара, равном максимальному пропуску в ч. с. д., без отборов пара из ч. в. д. и ч. с. д., при давлении в камере отбора перед ч. н. д. согласно условиям характеристики.

Мощность ч. н. д. определяют из выражения

$$N^{ч. н. д.} = N_э + \Delta N_{эм} - (N^{ч. в. д.} + N^{ч. с. д.}),$$

где величину $(N^{ч. в. д.} + N^{ч. с. д.})$ с учетом необходимых поправок получают из опыта при $N^{ч. н. д.}_{мин}$ (об $N^{ч. н. д.}_{мин}$ см. выше).

Таким образом, сводя к минимуму влияние одного из двух потоков влажного пара, определяют состояние пара другого потока.

Для турбин всех типов значительный интерес представляет опыт с нагрузкой, близкой к номинальной, при полностью открытом парораспределении (полном ходе сервомотора) и сниженном (прикрытием паровой задвижки) давлении перед стопорным клапаном.

Такой опыт позволяет определить путем пересчета на номинальные параметры свежего пара пропускную способность проточной части и соответствующую ей электрическую мощность установки. Кроме того, этот опыт весьма важен для определения к. п. д. установки, величина которого вследствие минимального дросселирования является наиболее надежной для сравнения при различных состояниях установки.

В программу испытания включают гарантийные режимы при соответствующих условиях, а также четыре-шесть опытов при чисто конденсационном режиме (без отборов пара), проводимых в начале испытания в качестве пробных.

б) Пробные опыты

Основным опытам предшествуют следующие пробные опыты:

- 1) один опыт при номинальной электрической и паровой нагрузке со всеми отборами пара;
- 2) четыре-шесть опытов без отборов при расходах свежего пара, равных 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 возможного максимального значения: опыт при наибольшем расходе свежего пара следует повторить при полном открытии парораспределения и сниженном давлении перед стопорным клапаном для более точного определения к. п. д. проточной части;
- 3) один опыт при холостом ходе для снятия статической характеристики регулирования и ее проверки.

Ценность опытов без отборов пара заключается в про-

верке и тарировке диафрагмы (сопла) на свежем паре, быстром и наиболее надежном определении внутреннего относительного к. п. д. всей проточной части при влажном паре на выхлопе или проверке баланса мощности установки типа П, при сравнительно простых условиях опытов и сокращенном объеме измерений.

Пробные опыты служат, кроме того, для тренировки наблюдателей, окончательной проверки работы установки, измерительных устройств и получения ориентировочных данных, используемых во время основных опытов.

Пробные опыты могут быть использованы наравне с основными, поскольку те и другие проводятся при одинаковых условиях.

Учитывая особенности установки, следует упрощать тепловую схему и условия испытания (отключать деаэра-тор и т. п.), применять особые методы измерений и режимы для наиболее простого, надежного и точного определения искомых величин.

Общепринята методика проведения опытов при неизменном положении парораспределения [Л. 29]. Его упор производят только против повышения нагрузки без всякого ограничения в сторону ее снижения. После упора рукоятку синхронизатора вращают в направлении набора нагрузки до появления полного одностороннего давления масла на поршень сервомотора для более надежного упора при колебаниях частоты; место и способ упора зависят от конструкции регулирования.

Положение парораспределения ч. с. д. и ч. н. д., если нельзя его поставить на упор, сохраняют неизменным, воздействуя вручную на систему регулирования; нужное давление в камерах отборов поддерживают путем параллельного включения РОУ (редукционно-увлажнительной установки) или отборов из других турбин. При этом достигается:

- 1) постоянство к. п. д. $\eta_{во}$ регулирующих ступеней во время опыта (см. стр. 31);
- 2) устойчивый режим нагрузки во время опыта, зависящий только от изменения параметров пара;
- 3) уменьшение погрешностей при приведении опытных данных к условиям характеристики, когда к. п. д. проточной части считают равным его опытному значению.

4. Методы измерений

В отношении измерения всех величин в программе или в приложениях к ней указывают место измерения, тип, класс точности, шкалу измерительных приборов, способ их тарировки и схему электрических измерений (см. приложение 3-4).

В отношении метода обработки опытных данных достаточно ссылки на печатный источник, где он рекомендован. В случае применения нового метода он должен быть подробно изложен и обоснован.

Количество пунктов измерений определяется соответственно § 2-2.

Запись основных величин во время опытов производят через 1—2 мин; второстепенных или устойчивых величин — через 5 мин; длительно устойчивых второстепенных величин — через 15—20 мин (температура воздуха у ртутных приборов, барометрическое давление).

Должна быть указана точность или возможная погрешность результатов испытания по расходу пара, тепла для установки типа К или по удельной теплофикационной выработке электроэнергии для установки типа П (см. гл. 5).

5. Испытательная тепловая схема

К программе испытания прилагается испытательная тепловая схема, предусматривающая:

1) надежное выделение установки с направлением потоков пара и воды по условиям испытания (посредством заглушек на линиях либо двух последовательных плотно закрытых задвижек с контрольным открытым спуском между ними; одной задвижки перед открытым концом трубопровода вместо заглушки; пломбированием закрытых задвижек после проверки их при одностороннем давлении);

2) правильное и по возможности непосредственное измерение всех величин.

На схеме условными обозначениями изображают:

а) все элементы тепловой схемы: подогреватели, конденсатор, эжектор, баки, насосы и др.;

б) все трубопроводы с арматурой, ответвления с обрывом их после закрытой арматуры и заглушек, а также с указанием направления оборванного потока (пара,

конденсата, дренажа, питательной и охлаждающей воды, отсоса воздуха, линии отбора проб и др.).

Сложные узлы, например схему паропроводов лабиринтных уплотнений, изображают отдельно.

Закрытую во время опытов арматуру выделяют (красным) для облегчения контроля.

На отдельном экземпляре схемы могут быть обозначены точки измерений или номера пунктов измерений.

Пример испытательной тепловой схемы для установки типа ВПТ-25 приведен в приложении 3-2.

3-4. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К ИСПЫТАНИЮ

Подготовка установки к испытанию заключается в обеспечении ее исправности, необходимых условий работы, режимов нагрузки и измерений во время опытов согласно программе испытания.

Монтаж измерительных устройств выполняют с соблюдением указанных выше требований по каждому виду измерений.

При изготовлении и монтаже первичных измерительных устройств — штуцеров, гильз, бобышек, диафрагм (сопел), уравнильных сосудов, а также фланцев для диафрагм следует руководствоваться чертежами «Отраслевых нормалей», разработанных отделами стандартизации и нормализации институтов «Оргэнергострой» и ЦКТИ (1956—1959 гг.).

Пример формы перечня подготовительных работ дан в приложении 3-6.

В отношении проверки исправности установки перед испытанием надо добавить следующие рекомендации.

На остановленной неостывшей турбине необходимо при постепенном перемещении сервомотора ступенями примерно в 5% полного хода записать положения органов парораспределения (клапанов), и по полученным данным построить характеристику $z^{кл} = f(z^{см})$.

Перемещение сервомотора осуществляют посредством ограничителя мощности в турбинах ЛМЗ серии высокого давления при работе масляного турбонасоса, или поворотом кулачкового вала при снятых (по необходимости) пружинах клапанов, либо другими способами в зависимости от системы регулирования.

По характеристикам $z^{кл} = f(z^{см})$, $p_2^{кл} = f(D_1)$ и $D_1 = f(z^{см})$ составляют заключение о правильности

установки элементов регулирования и парораспределения или о необходимости его наладки до проведения теплового испытания.

Водяную плотность конденсатора проверяют следующим образом:

а) из конденсатора сливают охлаждающую воду и конденсат, убеждаясь при этом, что протечка из парового пространства через открытый слив совсем не имеет места или же она ничтожно мала;

б) в конденсатор подают охлаждающую воду и при закрытых сливных задвижках повышают ее давление приблизительно до 1 *атм*. При недостаточном давлении создают в паровом пространстве разрежение пусковым эжектором;

в) измеряют протечку ΔW_0 [кг] в паровое пространство по открытому сливу (или по водомерному стеклу конденсатора при вакууме в нем) в течение 30 мин;

г) если средняя разность давлений охлаждающей воды и в паровом пространстве конденсатора Δp_0 меньше, чем Δp_n в условиях испытания турбины, протечку для Δp_n определяют по формуле

$$\Delta W = \Delta W_0 \sqrt{\frac{\Delta p_n}{\Delta p_0} \cdot \frac{60}{30}} \text{ [кг/ч]}.$$

Присос сырой воды в конденсатор надежно и легко определяется по химическому анализу (например по жесткости) конденсата на ходу турбины при малом расходе пара в конденсатор или при холостом ходе.

Пример. Определить протечку сырой воды по следующим данным:

жесткость конденсата	3	мкг-экв/л
» сырой воды	800	»
» пара из котлов	2	»
расход пара в конденсатор	20	т/ч
Протечка сырой воды равна:		

$$\Delta W = \frac{(3 - 2) \cdot 20 \cdot 100}{(800 - 2) \cdot 20} = 24 \text{ кг/ч}.$$

Водяную плотность подогревателей проверяют под рабочим давлением воды при закрытом подводе пара и открытом сливе из парового пространства в течение 15—30 мин.

3-5. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПОДГОТОВКИ ИСПЫТАНИЯ

Если испытание производится на договорных началах, то согласно договору заказчик обязан:

1) предоставить запираемое помещение для наблюдателей и для измерительных приборов вблизи установки с необходимым оборудованием (освещение, телефон, вешалка, столы, сиденья и др.);

2) выдать для ознакомления техническую документацию по установке;

3) выполнить подготовительные работы и предоставить установку для испытания по согласованной программе в назначенные сроки;

4) нести полную ответственность за нормальную работу установки во время испытания;

5) выделить ответственное лицо для участия в проведении испытания и обеспечения соответствующих условий работы и режимов нагрузки установки;

6) другие требования — по местным условиям.

Выполнение подготовительных работ и проведение экспериментальной части испытания следует оформить распоряжением главного инженера ТЭС для своевременной подготовки персонала станции и определения его обязанностей в отношении испытания.

Если электрические замеры будет производить другая лаборатория, необходимо своевременно сообщить ей сроки, объем, условия и точность измерений, частоту и порядок записей, получить от нее официальное согласие, а также перечень необходимых подготовительных работ по электрической части и предлагаемые условия.

Подготовительные работы по электрической части должны производиться под наблюдением и по указаниям электролаборатории.

Организации, производящей испытание (ЭЛ), за одну-три недели до его начала необходимо:

а) подобрать соответствующие измерительные приборы с необходимым резервом, проверить их состояние, шкалы, срок действия паспортов; все приборы должны иметь заводский или порядковый номер;

б) произвести тарировку приборов — секундомеров, манометров, термометров, термопар, баков, измерительных диафрагм, трансформаторов, ваттметров, с оформлением протоколов (см. приложения 3-10, 3-11 и 3-12);

паспорта приборов и протоколы тарировки должны быть готовы для предъявления на ТЭС к началу и во время испытания;

в) составить таблицу расчетных данных измерительных диафрагм (см. приложение 3-13);

г) после расстановки приборов распределить по журналам все пункты измерений с учетом важности измеряемых величин, расположения приборов (исключая встречные передвижения наблюдателей), частоты записей, допустимой загрузки наблюдателей;

д) составить образцы всех журналов наблюдений, рассчитанные на один опыт продолжительностью 60 мин с поправками к показаниям приборов на местные условия (см. приложение 3-14);

е) составить список журналов наблюдений; на пунктах измерений повесить порядковые номера с обозначением измеряемой величины (см. приложение 3-15);

ж) составить журнал руководителя испытания (приложение 3-16), а также приложение 3-17 для сверки показаний приборов в ходе опытов;

з) выделить необходимое количество наблюдателей (по числу журналов плюс два), кратко ознакомить их с задачами, режимом и длительностью предстоящего испытания; обучить их в течение одного-двух дней (см. Инструкцию для наблюдателей, приложение 3-20); распределить журналы наблюдений с учетом индивидуальных качеств (зрения, роста) наблюдателей;

и) оформить заявку на пропуск в помещение ТЭС всем участникам испытания (по общему списку);

к) обеспечить путем тщательной упаковки (применением футляров с мягкой обивкой, амортизаторов и выбором подходящего транспорта) сохранность приборов при их перевозке, особенно манометров и стеклянных термометров, которые надо устанавливать в вертикальном положении и предохранять от сотрясений;

л) составить перечень имущества ЭЛ, отправляемого на испытание (см. приложение 3-21);

м) проверить наличие необходимых запасных частей, инструмента и приборов по следующему примерному перечню:

комплект проверенных контрольных приборов — секундомер, часы, термометры, манометры, барометр, тахо-

метр; приспособления для упора парораспределения и для тарировки баков; стеклянные трубки для дифманометров; тройники, прокладки, трехходовые краны и вентили, переходы с одной резьбы на другую и на резиновый шланг, медные трубки с накидными гайками, чистая ртуть;

диаграммная бумага для самописцев; для потенциометров — нормальные элементы, сухие батареи, компенсационный провод; переносный потенциометр типа ПП или электронный типа ЭПД, ЭПВ с надежным многоточечным переключателем для контроля и в резерв в случае неисправности автоматических потенциометров; $i-s$ диаграмма и таблицы для водяного пара;

защитные очки, отвесы, лупы, воздушные сопла, кронциркуль, стальная рулетка и линейка, разводной ключ, отвертка, плоскогубцы, мягкая проволока, шпагат, контрольные замки;

бумага миллиметровая и писчая, шиватели, скрепки, кнопки, карандаши (авторучки), планшеты, точилки, резинки, чернила, клей, бланки журналов наблюдений, логарифмическая линейка, лекало, угольник, фонари; мыло, полотенце, одежная щетка, мелки.

Приложения к третьей главе

3-1. Программа теплового испытания. 3-2. Испытательная тепловая схема. 3-3. Эскиз устройства для тарировки измерительных диафрагм на конденсате. 3-4. Схема электрических измерений (в трехфазной четырехпроводной сети). 3-5. Перечень пунктов измерений. 3-6. Перечень подготовительных работ. 3-7. Техническая характеристика установки. 3-8. Тепловые характеристики установки. 3-9. Характеристики существующих измерительных устройств, используемых при испытании. 3-10. Протокол тарировки пружинных манометров. 3-11. Протокол проверки диафрагмы. 3-12. Результаты тарировки диафрагм по мерному баку. 3-12а. Протокол тарировки мерного бака. 3-12б. Протокол тарировки вспомогательного мерного бака. 3-13. Расчетные данные измерительных диафрагм. 3-14. Журнал наблюдений. 3-15. Список журналов наблюдений. 3-16. Журнал руководителя испытания. 3-17. Сверка показаний измерительных приборов. 3-18. Задание по режиму и условиям работы установки. 3-19. Показатели экономичности работы установки. 3-20. Инструкция для наблюдателей. 3-21. Перечень имущества ЭЛ, отправляемого на ТЭС.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-1

«Утверждаю»
Главный инженер
Энергоуправления

« — — — — — » 19 г.

ПРОГРАММА

теплового испытания паротурбинной установки типа ВПТ-25-3

Дата испытания —————

1. Цель испытания

Целью испытания является:

- Получение тепловых характеристик установки:
 - расхода пара и тепла на установку (проверка гарантий);
 - давления за паровпускными клапанами;
 - давления в камерах отборов и регулирующих ступеней;
 - внутреннего относительного к. п. д. проточной части;
 - температуры конденсата и питательной воды за подогревателями;
 - давления в конденсаторе при одних значениях расхода и температуры охлаждающей воды.
2. Снятие статической характеристики регулирования и проверка его работы при сбросе полной нагрузки.
3. Получение рабочих характеристик конденсатного, сливного, циркуляционного насосов и графика экономического вакуума (давления в конденсаторе) при одной температуре охлаждающей воды.
4. Оценка показателей работы установки и указание путей повышения ее экономичности.

Тепловые характеристики должны быть составлены для следующих условий:

- тепловая схема и техническая характеристика установки — по гарантийным (проектным) данным; состояние — исправное; рабочие поверхности проточной части, подогревателей и конденсатора — чистые;
- параметры пара перед стопорным клапаном: $p_1 = 90 \text{ атa}$; $t_1 = 500^\circ \text{C}$; давление выхлопа и в камерах регулируемых отборов: $p_2 = 0,05 \text{ атa}$; $p_n = 8 \text{ атa}$; $p_T = 1,2 \text{ атa}$;
- расход питательной воды равен расходу свежего пара на турбину;
- температура конденсата и питательной воды за подогревателями (по данным испытания), из деаэраторов 1,2 и 6,0 атa — 100 и 158° C;
- к. п. д. генератора по данным гарантий (или испытаний однотипного генератора с водородным охлаждением); напряжение 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,8$;

е) максимум расхода пара:

свежего 200 т/час

из регулируемых отборов:

I 160 »

II 100 »

ж) максимум электрической нагрузки 30 Мвт

Испытание установки проводится впервые после ее монтажа.

2. Объем экспериментальных работ

В экспериментальную часть испытания входит проведение следующих опытов:

- 38 опытов для получения тепловых характеристик установки;
- 3 опыта для снятия статической характеристики регулирования при холостом ходе;
- 4 опыта при сбросах нагрузки.

Кроме того, по отдельным программам проводятся опыты для получения характеристик конденсатного, сливного и циркуляционных насосов и графика экономического вакуума в конденсаторе при одной температуре охлаждающей воды.

3. Испытательная схема

Испытательная тепловая схема установки принимается по приложению 3-2.

Отличия схемы от гарантий (проекта): —————

4. Условия проведения теплового испытания

1. Техническая характеристика установки соответствует гарантийным (проектным) данным. Установка, включая тепловую изоляцию горячих поверхностей, находится в исправном состоянии. Протечка воды в паровое пространство конденсатора и подогревателей — до 160 кг/ч. Присос воздуха в конденсатор — до 8 кг/ч. Число часов работы: после ревизии — до 300 час; после промывки проточной части — до 50 час (по необходимости); после чистки конденсатора — до 50 час.
2. К моменту испытания ТГ № — находится под нагрузкой не менее 8 час после пуска.
3. Режим нагрузки ТГ № — во время опытов поддерживается в соответствии с заявкой, согласованной с ЭП и оформленной ТЭС в установленном порядке (см. раздел 5).

4. Параметры свежего пара перед стопорным клапаном и в камерах регулируемых отборов не выходят за пределы:

$$p_1 = 90 \pm 1 \text{ атa};$$

$$t_1 = 500 \pm 10^\circ \text{C}$$

(при повышенном давлении прикрывается главная паровая задвижка);

$$p_n = 8 \pm 0,4 \text{ атa},$$

а в отдельных опытах — до 10 и $13 \pm 0,4 \text{ атa}$;

$$p_T = 1,2 \pm 0,1 \text{ атa},$$

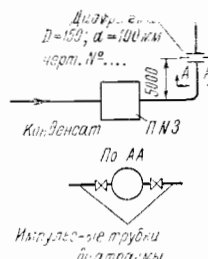
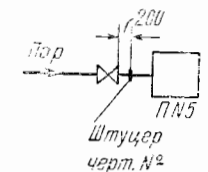
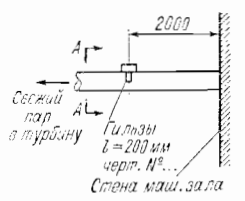
а в отдельных опытах — до $2,4 \pm 0,1 \text{ атa}$.

5. Расход питательной воды через подогреватели высокого давления, равный расходу свежего пара, а также расход конденсата через подогреватель № 3, равный расходу пара на входе в ч. с. д., поддерживаются с отклонениями не более $\pm 5\%$ посредством задвижек на выходе из подогревателя № 5 и на возврате конденсата в линию перед подогревателем № 3.

Перечень подготовительных работ

№ пп.	Содержание работ	Эскиз, примечание
I. По состоянию установки		
1	Очистка с паровой и водяной сторон трубок конденсатора и подогревателей; промывка проточной части турбины (по надобности)	
2	Выявление и устранение повышенной водяной и воздушной неплотности конденсатора, подогревателей, устранение других дефектов	
II. По тепловой схеме		
1	Монтаж новых трубопроводов, арматуры, баков	Черт. №____, приложение____
2	Проверка плотности всей арматуры, закрытой во время испытания	
	Установка заглушек, контрольных спусков между двумя последовательными закрытыми задвижками	См. испытательную тепловую схему — приложение____
3	Проверка полного открытия задвижек и обратных клапанов, открытых во время испытания	
III. По режиму нагрузки		
1	Изготовление упрочных приспособлений для парораспределения	Черт. №____
2	Практическая проверка возможности выполнения всех условий проведения испытания	
		См. приложение 3-1
IV. По измерениям		
А. Измерение мощности		
1	Установка лабораторных измерительных трансформаторов тока и напряжения*	См. схему электрических измерений — приложение____
2	Монтаж вторичных цепей от измерительных трансформаторов к лабораторному счетчику и ваттметрам*	
Б. Измерение расходов		
3	Проверка размеров и состояния эксплуатационных измерительных диафрагм: * на линии свежего пара	

* Работа выполняется при участии представителя ЭЛ.

№ пп.	Содержание работ	Эскиз, примечание
4	Изготовление и установка новых камерных диафрагм (со штуцерами, вентильками, уравнительными сосудами на линии пара и фланцами) для измерения расхода: * конденсата за ППД № 3	 Рис. 1
5	В. Измерение давлений Изготовление и установка штуцеров (с вентильками) для измерения давления пара: первого отбора, перед подогревателем № 5	 Рис. 2
6	Г. Измерение температур Очистка изнутри и снаружи термометрических гильз для измерения температуры: конденсата на входе и выходе у подогревателей	 Рис. 3
7	Изготовление и установка термометрических гильз для измерения температуры: свежего пара	
Д. Измерение механических величин и уровней		
8	Изготовление стрелок и шкал для измерения перемещения элементов регулирования и парораспределения *	
9	Установка, замена водомерных стекол со шкалами: у подогревателя № 1	
10	Установка (проверка) дистанционных указателей уровня:	

* Работа выполняется при участии представителя ЭЛ.

6. Отклонения расходов пара из регулируемых отборов от заданных величин поддерживаются в пределах $\pm 5\%$ путем изменения потребления и регулировки подачи пара от параллельно включенных турбин или РОУ.

7. Между коромыслом сервомотора и лапой цилиндра ч. в. д. устанавливается упорный болт для обеспечения неизменного открытия сервомотора ч. в. д. во время каждого опыта (возможность снижения нагрузки не ограничивается). В отдельных опытах все клапаны ч. в. д. полностью открыты, а давление перед стопорным клапаном посредством главной паровой задвижки снижено примерно до 70 атм .

8. Открытие поворотных диафрагм регулируемых отборов поддерживается постоянным путем воздействия вручную на пружины включенных регуляторов давления в отборах.

9. Продувочные вентили, предохранительные клапаны, задвижки на линии добавки химически очищенной воды в конденсатор и другая арматура, отмеченная на испытательной тепловой схеме, плотно закрыты.

10. В подогревателях поддерживается постоянный, необходимый для гидрозатвора уровень конденсата греющего пара, а в конденсаторе — минимально допустимый уровень; регулятор уровня при необходимости отключается.

11. В отдельных опытах конденсат греющего пара из подогревателя № 1 направляется в конденсатор при остановленном сливном насосе, и отключаются другие подогреватели.

12. Перед соплами эжектора поддерживается постоянное давление в пределах $17 \pm 1 \text{ атм}$. Расход пара на уплотнения — минимален.

13. Расход охлаждающей воды на конденсатор в ряде опытов изменяется по указанию руководителя испытания в пределах от — до $\text{м}^3/\text{ч}$ с изменением давления в конденсаторе от $0,02$ до $0,10 \text{ атм}$, температуры воды на сливах справа и слева расходятся не более чем на $0,5^\circ \text{C}$.

14. О необходимых изменениях в тепловой схеме и в режиме работы ТГ № _____ во время опытов дежурный персонал ТЭС сообщает руководителю испытания.

15. Ответственность за нормальную работу оборудования несет персонал ТЭС. В аварийных случаях испытание прекращается и действия персонала определяются существующими инструкциями.

16. Продолжительность каждого опыта составляет $0,5$ — $1,5 \text{ час}$. Промежутки между опытами, исключая время перехода с одного режима на другой, — 15 — 30 мин .

5. Календарный режимный план проведения испытания

А. Подготовка испытанию

№ пп.	Дата, часы	Содержание работы	Требуемые условия
1		Тарировка мерных баков	Наполнение мерных баков и слив воды ($t \leq 30^\circ \text{C}$)
2		Обследование установок. Выявление недостатков в ее работе — см. приложение 3-19	ТГ № _____ в работе при различных режимах нагрузки

№ пп.	Дата, часы	Содержание работы	Требуемые условия
3		Снятие статической характеристики регулирования, ее исправление. Проверка водяной плотности конденсатора по химическому анализу конденсата. Сверка показаний вакуумметров	ТГ № _____ на холостом ходу с отключенным от сети генератором
4		Установка измерительных трансформаторов тока и напряжения с подключением лабораторных приборов по испытательной электрической схеме	ТГ № _____ остановлен; подключение приборов при участии представителя электроцеха ТЭС
5		Снятие характеристики перемещения клапанов в зависимости от хода сервомотора ч. в. д., ее исправление	ТГ № _____ остановлен; в работе находится масляный турбонасос
6		Тарировка мерных диафрагм Тарировка конденсатора Испытание конденсаторного и сливного насосов	а) ТГ № _____ остановлен б) наполнение конденсатора водой ($t \leq 30^\circ \text{C}$) в) подача конденсатным или сливным насосом воды из конденсатора по изолированной схеме через диафрагмы в мерный бак и его опорожнение
7		Проверка водяной плотности конденсатора	а) ТГ № _____ остановлен б) напорные задвижки конденсатора открыты, сливные закрыты; давление охлаждающей воды перед конденсатором — 1 атм в) вода из конденсатора (протечка) сливается в мерную посуду
8		Проверка водяной плотности подогревателей	а) ТГ № _____ остановлен б) подогреватели находятся под рабочим давлением в) вода (протечка) сливается через дренажные спуски или контролируется по водомерным стеклам

№ пп.	Дата, часы	Содержание работы	Требуемые условия
9		Проверка плотности запорной арматуры по испытательной тепловой схеме; установка заглушек	а) ТГ № — остановлен б) разбалчивание соединений арматуры и ее испытание при одностороннем давлении
10		Устранение мест притока воздуха в конденсатор и других дефектов по специальному списку. Измерение диаметра сопел рабочего эжектора и ограничительных шайб на отсосах воздуха из подогревателей	а) ТГ № — остановлен б) прочие условия — соответственно списку дефектов
11		Промывка проточной части турбины (производится по надобности)	ТГ № — работает при нагрузке <i>Мет</i> с пониженной температурой свежего пара — в соответствии с эксплуатационной инструкцией или по специальной программе, утвержденной гл. инженером ТЭС

Б. Пробные и основные опыты

Наименование	Номер опыта	Дата	Часы	Мощность, Мвт	Расход пара — свежего и из регулируемых отборов, т/ч			Давление в камерах регулируемых отборов, атм		Ход сервомоторов з. мм		
					D_1	D_{II}	D_T	p_{II}	p_T	ч. в. д.	ч. с. д.	ч. н. д.

Пробные опыты

1	—	—	0	15	0	0	—	—	—	120	120	
2	—	—	12	60	0	0	8	1,2	65	60	35	
3	—	—	20	80	0	0	8	1,2	85	80	50	
4	—	—	25	110	0	0	8	1,2	100	120	120	
5	—	—	39	200	150	0	8	1,2	160	50	30	
6	—	—	28	200	100	50	8	1,2	160	100	0	

Основные опыты

Характеристика	1	—	30	200	50	95	13	1,2	160	120	0	
ч. в. д.	2	—	26	170	25	95	13	1,2	145	120	0	
н	3	—	30	220	115	55	8	1,2	175	120	0	
с. д.	4	—	28	200	100	50	8	1,2	160	100	0	
	5	—	24	170	80	50	8	1,2	145	90	0	

Наименование	Номер опыта	Дата	Часы	Мощность, Мвт	Расход пара — свежего и из регулируемых отборов, т/ч			Давление в камерах регулируемых отборов, атм		Ход сервомоторов з. мм		
					D_1	D_{II}	D_T	p_{II}	p_T	ч. в. д.	ч. с. д.	ч. н. д.
	6			22	150	70	50	8	1,2	130	80	0
	7			18	130	50	45	8	1,2	120	65	0
	8			16	110	55	35	8	1,2	110	50	0
	9			11	90	45	20	8	1,2	90	40	0
	10			9	70	30	15	8	1,2	70	30	0
	11			7	55	20	10	8	1,2	60	20	0
	12			6	40	10	5	8	1,2	50	10	0
	13			29	110	0	10	13	1,6	110	120	120
	14			28	110	0	20	13	1,6	110	130	120
	15			26	110	0	40	13	1,2	110	120	120
Характеристика	16			24	110	0	50	13	1,2	110	120	165
ч. в. д.	17			24	110	0	50	13	1,2	110	120	95
	18			23	110	0	50	13	1,2	110	120	75
	19			23	110	0	60	13	1,2	110	120	60
	20			22	110	0	70	13	1,2	110	120	45
	21			20	110	0	80	13	1,2	110	120	30
	22			19	110	0	100	13	1,2	110	120	0
Гарантия	23			25	165	72	54	13	1,2	—	—	—
	24			25	143	50	40	10	1,2	—	—	—
	25			25	103	0	0	—	—	—	120	120
	26			20	129	50	40	10	1,2	—	—	—
	27			16	101	40	40	10	1,2	—	—	—

Примечания к пробным опытам:

Опыт № 1 выполняется при холостом ходе с отключенным от сети генератором и с сохранением возбуждения; конденсат откачивается в мерный бак с рециркуляцией через эжектор.

Опыт № 6 осуществляется при нормальной схеме регенерации.

В опытах № 2-5 дренаж из ПВД сливается в ПНД № 3.

Примечания к основным опытам:

1. Опыты № 1—12 проводятся при нормальной схеме регенерации.

2. Опыты № 13—22 выполняются без регенеративных отборов пара из ч. в. д. и ч. с. д.

3. Опыты № 1, 8, 15 и 20 повторяются:

№ 1 и 20 при $p_T = 1,8 \text{ атм}$

№ 8 » $p_{II} = 8$ и $p_T = 1,8 \text{ атм}$

№ 8 » $p_{II} = 13$ » $p_T = 1,2$ »

№ 15 » тех же параметрах

4. В опыте № 3 производится полное открытие парораспределения (полный ход сервомоторов) ч. в. д. и ч. с. д. при сниженном давлении пара перед стопорным клапаном.

5. Величины мощности и расходов пара для всех опытов указаны ориентировочно, в зависимости от заданного хода сервомоторов ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д.

6. Дата и часы проведения опытов уточняются при оформлении ТЭС заявки на испытание.

В. Снятие статической характеристики регулирования и испытание при сбросе нагрузки

Для снятия статической характеристики регулирования проводятся три опыта при холостом ходе (при отключенном от сети генераторе и с сохранением возбуждения), со снижением и повышением числа оборотов в пределах от 3150 до 2500 об/мин посредством обводного клапана главной паровой задвижки.

Испытание на сброс нагрузки производится по специальной программе и состоит из четырех опытов: два опыта со сбросом 20 и 30 Мвт при работе турбины без регулируемых отборов пара и два опыта со сбросом 20 и 30 Мвт при включенных регулируемых отборах.

6. Методы измерений и обработки опытных величин

Измерение мощности на зажимах генератора производится по схеме трех (двух) ваттметров приборами и трансформаторами тока и напряжения класса 0,5, а также образцовым электросчетчиком класса 0,5.

Расходы пара на турбину и в производственный отбор, конденсата и питательной воды измеряются диафрагмами, в соответствии с Правилами 27-54, и двухстекольными дифманометрами с ртутным заполнением.

Расход пара теплофикационного отбора определяется по расходу конденсата из бойлеров и контролируется по результату весового баланса пара — воды в установке.

До и после испытания производится тарировка диафрагм на конденсате по мерному баку емкостью не менее 3 м³, который должен быть смонтирован ТЭС по эскизу ЭЛ.

Давления выше 2 ата измеряются образцовыми манометрами класса 0,35, а ниже 2 ата — ртутными манометрами. Температура выше 200° С измеряется термодатчиками ХК и потенциометром ЭПП-09, а до 200° С — лабораторными ртутными термометрами (см. перечень пунктов измерений, приложение 3-5).

Кроме того, снимаются показания основных эксплуатационных приборов.

При сбросах нагрузки производится не только регистрация максимального числа оборотов, но и автоматическая запись перемещений элементов регулирования и парораспределения, а также других величин на осциллограф.

Обработка опытных данных выполняется в соответствии с рекомендациями _____

Точность результатов испытания по расходу пара и тепла оценивается $\pm 0,5\%$ при нагрузке, близкой к номинальной.

7. Подготовка к испытанию

1. Перед началом испытания ТГ § _____ останавливается на 24 часа для его подготовки — см. раздел 5.

2. Во время испытания в установке не должно быть ненормальных, оказывающих влияние на экономичность ее работы. Все подготовительные работы по приложению 3-6 должны быть выполнены.

8. Организационная часть

1. Для участия в проведении испытания ТЭС выделяет своего представителя, ответственного за своевременное оформление заявок и обеспечение необходимых условий работы и режимов нагрузки установки на время опытов.

2. ТЭС выделяет одного монтера теплового контроля и наблюдателей для записи показаний приборов.

3. В проведении испытания участвуют:

от ТЭС _____

от завода-изготовителя _____

от ЭЛ — руководитель испытания _____

наблюдатели _____ человек.

Подпись представителя ЭЛ _____

Согласовано:

Гл. инженер ТЭС _____ Завод-изготовитель _____

Начальник ПТО _____ ДС Энергоуправления _____

Начальник машинного цеха _____ Плановый отдел Энергоуправления _____

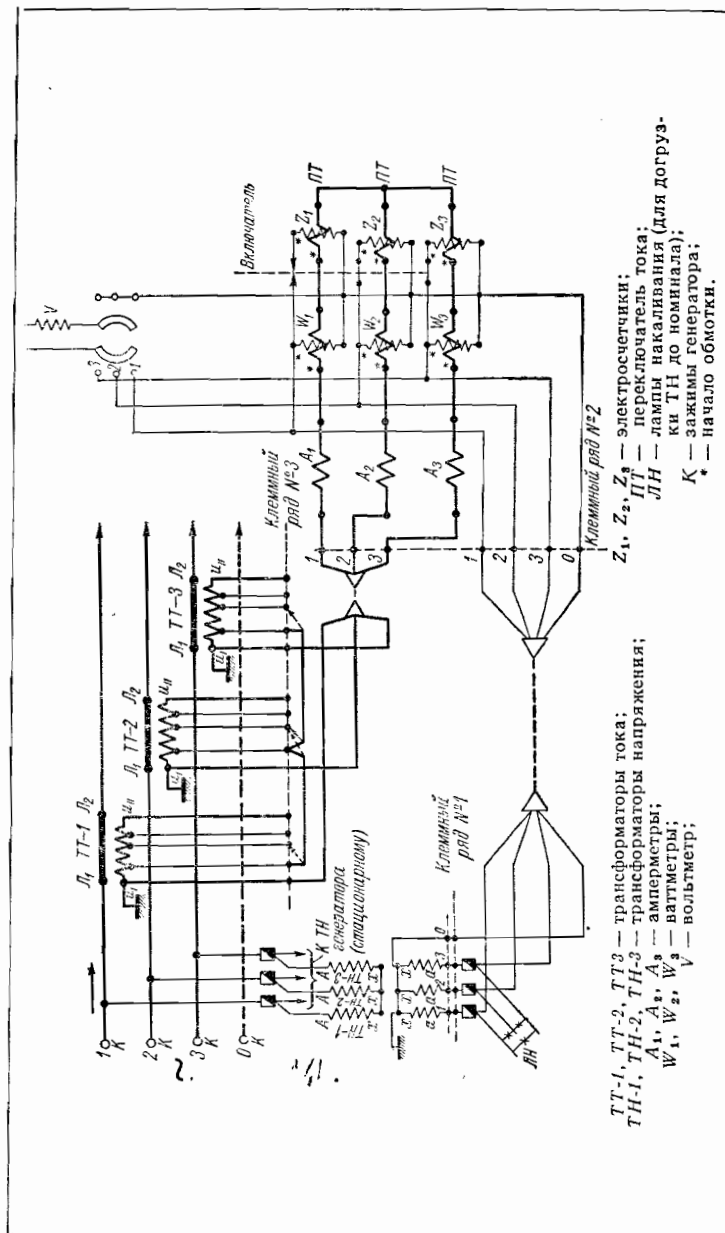
Начальник котельного цеха _____

Начальник электроцеха _____

Начальник ТИЛ _____

Ст. ДИС _____

Схема электрических измерений (в трехфазной четырехпроводной сети)



Перечень пунктов измерений

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Тип прибора	Шкала прибора	Примечание
Расход:					
1	свежего пара		ДП-610, дифманометр	1000 мм	
2	пара производственного отбора		То же	700 »	
3					
Давление:					
1	перед диафрагмой на свежем паре		Манометр класса 0,35	0—150 атм	
2	перед стопорным клапаном		То же	0—160 »	
3	за стопорным клапаном		»	0—160 »	
4	за первым регулирующим клапаном		»	0—160 »	
Температура:					
1	у диафрагмы на свежем паре		Термопара ХК с автоматическим потенциометром ЭПП-09	400—500° С	
	перед стопорным клапаном			400—600° С	
	после стопорного клапана			400—600° С	
По генератору:					
1	мощность генератора		Электрический счетчик класса 0,5.		
2	ток		Трансформаторы тока и напряжения класса 0,5		
3	напряжение		Два ваттметра, два амперметра, один вольтметр класса 0,5		
4	cos φ		Фазометр		
По регулированию:					
1	ход штока сервомотора ч. в. д.		Шкала, стрелка	0—180 мм	
2	подъем регулирующих клапанов ч. в. д.		То же	0—50 »	
3					

Руководитель испытания: _____

№ пп.	Содержание работ	Эскиз, примечание
	Е. Тарировка, монтаж и включение измерительных приборов	
11	Изготовление, установка приспособлений для тарировки диафрагм и мерных баков: * мерной посуды, весов, гири и др.	
12	Проверка эксплуатационных измерительных приборов установки с составлением акта	
13	Изготовление стендов, монтаж и включение лабораторных тепло- и электроизмерительных приборов *	
14	Оборудование освещения, сигнализации и площадок у пунктов измерений *	
15	Обеспечение исправности всех точек забора и коренных вентилей . .	
	V. Материалы, арматура и приборы, предоставляемые ТЭС	
1	Импульсные стальные трубы с внутренним диаметром 8—12 мм	400 мм
2	Вентили манометрические	40 шт.
3	Ртуть	20 кг

Приложения: чертежи — рисунки — схемы — (они должны быть достаточными для безошибочного выполнения работ при отсутствии представителя ЭЛ).

Руководитель испытания _____

Согласовано:

Начальник машинного цеха ТЭС _____

Начальник электроцеха _____

Начальник ТИЛ _____

* Работа выполняется при участии представителя ЭЛ.

Техническая характеристика установки

Дата составления характеристики _____

Материалы, по которым составлена характеристика _____

I. Общие сведения

Наименование станции _____

Станционный номер установки _____

Дата пуска в работу _____

Проработанное до начала испытания число часов:

после монтажа _____

после капитального ремонта _____

Завод-изготовитель турбины _____

Тип установки: ВПТ-25-3

Год изготовления турбины _____

Заводский номер турбины _____

II. Краткая техническая характеристика турбины

Мощность, кВт:	
номинальная	25 000
максимальная	30 000
минимальная	—
Число оборотов, об/мин	3 000
Давление свежего пара, ата	90
Температура свежего пара, °C	500

Число ступеней перед отборами:

I	5
II — регулируемым	9
III	12
IV — регулируемым	15
V	17

Регулируемые отборы:

II — $p_{п\text{ мин}}$ макс, ата	8	13
$D_{п\text{ макс}}$ м/ч	130	120
IV — $p_{т\text{ мин}}$ макс, ата	1,2	2,5
$D_{т\text{ макс}}$ м/ч	100	60

Давление выхлопа (в конденсаторе) p_2 макс, ата 0,085

Максимальный расход пара (м/ч) в:

ч. в. д.	200
ч. с. д.	120
ч. н. д.	100
конденсатор	78
Число цилиндров	1

Формула проточной части:

ч. в. д.	1К+8Д*
ч. с. д.	1Р+5Д
ч. н. д.	1Р+3Д
Число выхлопов	1
Парораспределение:	
ч. в. д.	4 регулирующих клапана
ч. с. д.	поворотная диафрагма
ч. н. д.	то же
Тип и рабочая поверхность теплообменников: конденсатора	25-КЦС-7; 1750 м ²
подогревателей:	
Тип эжектора	ЭП-2-400-3

III. Гарантийные данные турбины

Давление свежего пара, ата	90
Температура свежего пара, ата	500
Температура охлаждающей воды, °С	20
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	5000

Расход питательной воды равен расходу свежего пара.
Тепловая схема принимается по рис. 1.

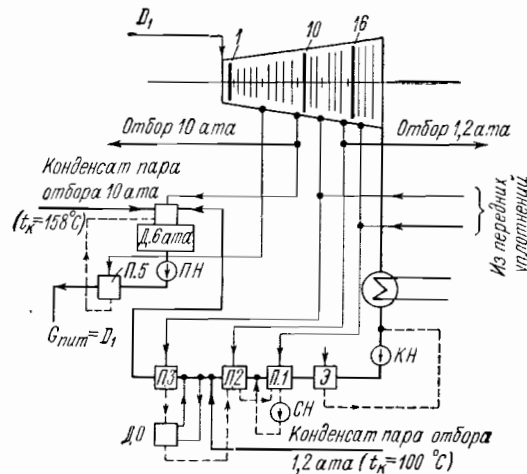


Рис. 1. Тепловая схема.

* К — регулирующая ступень давления с двумя ступенями скорости;
Р — регулирующая ступень давления с одной ступенью скорости;
Д — ступень давления.

Удельный расход пара для гарантийных режимов работы

Номер режима	Мощность на зажимах генератора, Мвт	Количество отбираемого пара (т/ч) при		К. п. д. генератора, %	Гарантийный удельный расход пара, кг/квт·ч	Температура питательной воды °С
		$p_{II}=10 \text{ ата}$	$p_I=1,2 \text{ ата}$			
1	25	72	54	98,2	6,65	201
2	25	50	40	98,2	5,92	197
3	25	0	0	98,2	4,12	187
4	20	50	40	98,2	6,47	192
5	16	40	40	98,2	6,73	187

Допуск по расходу пара составляет +5%. После 6500 час работы, но менее 12 месяцев после пуска — дополнительный допуск равен +1% при чистой проточной части, чистом конденсаторе и воздушной плотности, при которой падение вакуума после отключения эжектора и мощности 25 Мвт составляет 2 мм рт. ст. в минуту.

Поправочные кривые принимаются по данным завода.

Приложение. Сведения об авариях, ремонтах, заменах частей, в том числе дата чистки и число или процент заглушенных трубок теплообменников. Формуляры проточной части, уплотнений, парораспределения.

Образец более подробной технической характеристики см. [Л. 31, стр. 229—246].

IV. Краткая техническая характеристика генератора

Завод-изготовитель _____

Тип генератора _____

Год изготовления _____

Заводский номер _____

Мощность _____

Напряжение _____

Ток _____

Cos φ _____

Число оборотов _____

Охлаждение статора, ротора _____

Ток ротора _____

Возбудитель _____

Условия: $p_1 =$; $t_1 =$; $p_2 =$
 тепловая схема по рис..
 к.п.д. генератора по рис..
 температура конденсата по рис..

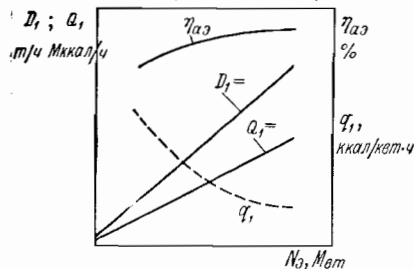


Рис. 5. Характеристика установки. Принципиальная тепловая схема помещена на этом рисунке. D_1 — расход свежего пара в час; Q_1 — расход тепла в час; q_1 — удельный расход тепла; η_{ag} — абсолютный электрический к. п. д.

Примечания:

- Для установки с регулируемыми отборами пара все рисунки, кроме рис. 4 и 5, составляют отдельно для ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д.; вместо рис. 5 помещают диаграммы режимов по расходу пара и по расходу тепла в час.
- Для установки типа П на рис. 5 вместо графиков Q_1 , q_1 и η_{ag} строят графики отпуски тепла Q_T паром отборов и противодавления, удельной теплотворной выработки электроэнергии y , расхода тепла на выработку электроэнергии и относительного электрического к. п. д. установки в зависимости от мощности N_3 .

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-9

Характеристика существующих измерительных устройств, используемых при испытании

№ пп.	Обозначение измеряемой величины	Характеристика устройства		Примечание
		приемника	измерительного прибора	
1	D_1	Камерная диафрагма: $D =$ _____ $d =$ _____ $t_1 =$ _____ $t_2 =$ _____	Расходомер. ДП-610 $h =$ _____ мм $G =$ _____	См. приложение 3-13
2	$t_1^{ст}$	Гильза: $l =$ _____ $d =$ _____ Монтаж и место установки — правильные	Потенциометр: ЭПП-09, ХК шкала $\theta - 60^\circ \text{C}$	
3	$p_1^{ст}$	Штуцер: $d =$ _____ резьба: _____ Монтаж и место установки — правильные	Манометр: класса 0,5; шкала $\theta - 160 \text{ кг/см}^2$	

ПРОТОКОЛ

тарировки пружинных манометров

« _____ » 19 _____ г.

Образцовый манометр (грузопоршневой)

№ _____ Шкала _____ Класс _____

Температура окружающего воздуха _____ $^\circ \text{C}$

№ пп.	Показание образцового манометра		Показания проверяемого манометра, кг/см ² (град)				Поправка (±), кг/см ²			Номер, пределы измерения, класс проверяемого манометра, обозначение измеряемой величины
	кг/см ²	град*	до испытания		после испытания		до испытания	после испытания	средняя	
			верх	низ	верх	низ				
1 2	70 75		70,1 75,0	70,2 75,2	70,2 75,2	70,2 75,2	-0,15 -0,1	-0,2 -0,2	-0,17 -0,15	№ 2915 0—100 0,5 p ₂ ^{IV} кл
1 2										
1 2										
1 2										

Тарировку выполнил _____

* Давление в градусах шкалы проверяемого образцового манометра (по надобности).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-11

Протокол проверки диафрагмы

« _____ » 19 _____ г.

Наименование	Обозначение измеряемой величины $G_{плт}$			
	расчет	фактически		
Внутренний диаметр трубы вблизи диафрагмы D , мм *				
Диаметр отверстия диафрагмы d , мм *				
Диаметр расточки кольцевой камеры диафрагмы D^k , мм *				
Прямые участки трубопровода до и после диафрагмы:				
l_1 мм				
l_2 мм				
Проверили:	от ЭЛ _____			
	от ТЭС _____			

* По четырем перпендикулярным направлениям.
 Примечание. Выполнение других требований см. стр. 131—133.

ПРОТОКОЛ

тарировки мерного бака (по рис. 2-25, б)

1. Порядковый номер тарировки
2. Температура воды t , °C
3. Всего слито бачков z
4. Вес остатка воды в последнем бачке (при наполнении бака до уровня перелива) g , кг
5. Высота недолива в горле бака (при целом числе слитых бачков) H , мм
6. Сечение горла бака F , мм²
7. Средняя емкость бачка по протоколу его тарировки (см. приложение 3-12, б) V , л
8. Емкость бака до уровня перелива:

$$V = zV_1 - \frac{g \cdot 10^3}{\gamma_t} \text{ л (см. п. 4),}$$

или

$$V = zV_1 + \frac{HF}{10^6} \text{ л (см. п. 5).}$$

9. Окончательная (средняя) емкость бака V , л

Примечания:

1. Перед тарировкой бак заполнен водой и опорожнен (для смачивания стенок бака, заполнения «мертвых» мест).
2. Утечки воды из бака во время тарировки не было.
3. γ_t — удельный вес воды, кг/м³.

Тарировку выполнил _____

«_____» _____ 19____ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-12в

ПРОТОКОЛ

тарировки вспомогательного мерного бачка

Порядковый номер взвешенной порции воды	Первая тарировка	
	вес порции воды (~ 10 кг) g , кг	средняя температура воды t , °C
1.		
2.		
3.		
Остаток (при наполнении бачка, со знаком минус)		
Итого вес воды в бачке $G_1 = \Sigma g$, кг		

Порядковый номер взвешенной порции воды	Первая тарировка	
	вес порции воды (~ 10 кг) g , кг	средняя температура воды t , °C
То же, с поправкой на вытеснение воздуха		
$G = 1,001 G_1$, кг		
Емкость бачка $V_1 = 10^3 G : \gamma_t$, л		
Окончательная (средняя) емкость бачка V_1 , л		

Примечания:

1. Перед тарировкой бачок заполнен водой и опорожнен (для смачивания стенок бачка, заполнения «мертвых» мест).
2. Протечки воды из бачка и в бачок во время тарировки не было.
3. Таримуемая емкость бачка та же, что и при тарировке им большего бака. Бачок заполнялся до уровня перелива.
4. Перед взвешиванием каждой порции тара уравнивалась.
5. Взвешивание порций производилось на чашечных весах с нечувствительностью — г, или — % (определялась путем установки на обеих чашках 10 кг гирь и добавкой разнoвеса на одну и другую чашки).
6. γ_t — удельный вес воды, кг/м³.

Тарировку выполнил _____

«_____» _____ 19____ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-13

Расчетные данные измерительных диафрагм

Обозначение измеряемой величины, формула расхода	Поправки		Расчетные данные							
	ΔG_p , проц/ата	ΔG_t , проц/град	G , кг/ч	h , мм	ε	ρ , ата	t , °C	γ , кг/м ³	D , мм	d , мм
$D_1 = 6330 \sqrt{h}$ [кг/ч]	$\pm/\pm 0,58$	$\pm/\mp 0,18$								
$G_K = 5000 \sqrt{h}$ [кг/ч]	—	$\pm/\mp 0,11$								

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ № 1

Испытание _____ ТГ № 1 ТЭС № 5 Опыт № 1

Наблюдатель _____ « _____ » _____ 19 ____ г.

Наименование		Обозначение измеряемой величины				Примечание	
		D_1		p_1^d	t_{pt}		...
		левое стекло	правое стекло				
№ прибора № пункта замера		18 1		29 158	135 3		
№ пп.	Время						
1							
2							
3							
.							
.							
.							
.							
59							
60							
Сумма							
Количество записей							
Среднее							
Поправки на:							
паспорт				+0,3			
высоту				-0,2			
барометр				+1,04			
Среднее с поправками							
Максимум							
Минимум							

Подпись наблюдателя _____

Список журналов наблюдений

Номер журнала	Обозначение измеряемой величины	Номера пунктов замера	Фамилия наблюдателя	Примечание
1	D_1, p_1^d, t_{pt}	1; 2; 3		Запись подчеркнутых величин производится через 1—2 мин, неподчеркнутых — через 5 мин
2	Номер пункта замера			
	○ 2 p_1^g			

Сверка показаний измерительных приборов

№ пп.	Обозначение измеряемой величины	Прибор, обозначение пункта измерения	Показания приборов					Примечания	
			Номера опытов						
			1	2	3	4	5		
1	$N_{\text{Э}}$	Электросчетчик Ваттметр	$N_{\text{Э}}^{\text{с}}$ $N_{\text{Э}}^{\text{в}}$						
2	D_1^*	Расходомер Дифманометр	$D_1^{\text{р}}$ $D_1^{\text{д}}$						
3	$G_{\text{пит}}^*$	Расходомер Дифманометр	$G_{\text{пит}}^{\text{р}}$ $G_{\text{пит}}^{\text{д}}$						
4	p_1	У диафрагмы Перед стопорным клапаном После стопорного клапана	$p_1^{\text{д}}$ $p_1^{\text{ст}}$ $p_2^{\text{ст}}$						
5	t_1	У диафрагмы Перед стопорным клапаном После стопорного клапана	$t_1^{\text{д}}$ $t_1^{\text{ст}}$ $t_2^{\text{ст}}$						
6	p_2	На выходе: справа слева	$p_2^{\text{пр}}$ $p_2^{\text{лев}}$						
7	δt^{V}	Пар Конденсат Дренаж	$t_{\text{нас}}^{\text{V}}$ $t_{\text{к2}}^{\text{V}}$ $t_{\text{др}}^{\text{V}}$						

II. Режим нагрузки

1. $z^{ч. в. д.} = \text{const}$; 2. $z^{ч. с. д.} = \text{const}$; 3. $z^{ч. н. д.} = \text{const}$ — по программе испытания.

III. Измерения

1. Устойчивые и правильные показания всех приборов по перечню пунктов измерений (см. приложение 3-17).

2. Правильная запись показаний по сигналам.

3. Отметка начала и конца опыта на лентах самописцев, показаний электросчетчиков, уровней в конденсаторе, подогревателях и др.

IV. Характеристика проведенных опытов

[illegible]

V. Замечания по выполнению разделов I, II и III в ходе опытов

Номер опыта	Замечания по опыту	Общие замечания

* По расчетным данным диафрагмы — см. приложение 3-13. Действительное значение D_1 — по дифманометру равно:

$$D_1 \approx 6,33 \sqrt{h} + \Delta D_p (p_1^D - p) + \Delta D_t (t_1^D - t) [m/u],$$

где ΔD_p , ΔD_t , p и t — по приложению 3-13.

Баланс пара — воды (в зависимости от тепловой схемы):

$$D_1 \approx G_{\text{к}}^{\text{III}} + G_{\text{пит}} \frac{\Delta i_{\text{пит}}}{550};$$

здесь $\Delta t_{\text{пит}}$ — общее повышение теплосодержания воды в ПВД (отборы пара на сторону и на деаэраторы 1,2 *ата* и 6 *ата*, а также добавка воды из деаэратора 1,2 *ата* отключены; дренаж из ПВД поступает прямо в деаэратор 6 *ата*) — см. тепловую схему на рис. 5-2;

$D_1 = G_K^{III}$ — в опытах с отключенными регулирующими отборами пара и подогревателем № 5 (или с каскадным удалением его дренажа).

Приведенные величины расхода свежего пара и мощности при незначительных отклонениях в тепловой схеме определяют из выражений

$$D_{1x} = D_{1оп} \frac{p_{1x}}{p_{1оп}} \sqrt{\frac{T_{1оп}}{T_{1x}}};$$

$$N_{эx} \approx N_{эоп} \frac{D_{1x}}{D_{1оп}} + (p_{2x} - p_{2оп}) \Delta' N_{p_2}.$$

Приведенные значения других величин — см. стр. 267.
В установке типа П проверяют баланс мощности:

$$N_{э} + \Delta N_{эм} = \frac{\sum D h_i}{860}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-18

Задание по режиму и условиям работы установки

ТГ № _____ опыт № 6 (см. приложение 3-1)

с _____ час до _____ час _____ 19 ____ г.

1. Ход сервомоторов:

ч. в. д. (с упором против увеличения нагрузки) 130 мм
ч. с. д. 80 »
ч. н. д. 0 »

2. Давление пара:

перед стопорным клапаном $89 \pm 0,5$ ати
в камере промышленного отбора $7 \pm 0,5$ »
в камере теплофикационного отбора $0,2 \pm 0,05$ »
в конденсаторе (вакуум) $95 \pm 0,5\%$

3. Приблизительный расход пара:

свежего 150 т/ч
промышленного отбора 70 »
теплофикационного отбора 50 »

Приблизительная электрическая нагрузка составляет 22 Мвт.

4. Расход питательной воды равен расходу свежего пара $\pm 2\%$. Все подогреватели включены.

5. Давление пара перед соплами эжектора составляет 17 ± 1 ати.

6. Задвижки № _____ плотно закрыты — см. испытательную тепловую схему.

7. Уровень в конденсаторе _____

8. _____

Руководитель испытания _____

Представитель ТЭС _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-19

Показатели экономичности работы паротурбинной установки

Наименование	Обозначение величины	Значения величин	
		фактические	нормальные (проектные)
I. Парораспределение			
1. Падение давления в полностью открытых клапанах при максимальном расходе пара (____ т/ч), кг/см²:			
стопорном	$\Delta' p_{ст}$	1,0	1,0 ($\sim 0,01 p_1$)
I	$\Delta' p_{Iкл}$	4,0	3,5 ($\leq 0,05 p_1$)
II	$\Delta' p_{IIкл}$	3,5	3,5 ($\leq 0,05 p_1$)
2. Падение давления в клапане в момент начала открытия очередного клапана, кг/см²:			
I	$\Delta'' p_{Iкл}$	10	8 } $\leq 0,1 p_1$ Проектные данные 10 } $p = f(D_1)$
II	$\Delta'' p_{IIкл}$	12	
3. Последовательность открытия клапанов			
	$z_{кл}$	$z_{кл} =$ $= f(z_{см}; \varphi)$	Проектный график $z_{кл} = f(z_{см}; \varphi)$
II. Проточная часть			
1. Давление в контрольных ступенях при максимальном расходе пара (____ т/ч) и давлении на выходе _____, атм:			
в регулирующей ступени	$p_{рс}$	55,0	55 } Проектные 27 } данные
в камере I отбора	p_{Io}	27,5	
2. Внутренний относительный к. п. д. проточной части, %:			
группы ступеней 1—5	η_{1-5}	70,0	75,0 — проектные (лучшие современные данные)
всей проточной части (диаграммный)	$\eta_{в02}$	80	81,0 — то же
3. Расход пара, отсасываемого из передних уплотнений в третий и пятый отборы при максимальном расходе свежего пара (____ т/ч), т/ч			
	$D''_{упл}$	6,0	5,0 — проектные данные
III. Подогреватели, деаэратор			
1. Температурный напор в подогревателях при максимальном расходе пара через питающую их проточную часть (____ т/ч) и равном ему расходе воды через подогреватели, °C:			
подогреватель № 1	δt^I	10	5—10 } проектные 0—5 } данные
» № 2	δt^{II}	8	

Наименование	Обозначение величины	Значения величин	
		фактические	нормальные (проектные)
2. Разность давлений p в камере отбора и на входе в подогреватель при нагрузке по п.1: подогреватель № 1 № 2 в деаэратор 1,2 атм		0,02 0,3 0,08	0,02 0,3 0,06 } $\sim 0,05 p$
3. Разность температур воды на выходе из подогревателя до и после обводного клапана, °C: подогреватель № 5	Δt	0	0 — для всех подогревателей
4. Наличие гидрозатвора во всех подогревателях; удовлетворительная тепловая изоляция			
5. Разность давлений воды на входе в подогреватель и на выходе из него, атм: подогреватель № 1	$\Delta p_{\text{в}}$	0,5	0,5 (проектные данные)
IV. Конденсатор			
1. Температурный напор при максимальном расходе пара в конденсатор ($D_2 = \frac{m}{4}$), температуре охлаждающей воды °C и кратности охлаждения	$\delta t^{\text{к}}$	8	По рис. 1-29
2. Расход воздуха, удаляемого из конденсатора, кг/ч	$G_{\text{возд}}^{\text{к}}$	5	2—8 стр. 49
3. Давление пара перед эжектором, атм	$p_1^{\text{э}}$	18	16 (проектные данные)
4. Переохлаждение конденсата, °C	$\Delta t_{\text{к}}^{\text{к}}$	1	0—1
5. Паровое сопротивление, мм рт. ст.	$\Delta p^{\text{к}}$	4	2—4
V. Тепловая схема			
1. Разность давлений p в камере регулируемого отбора и в коллекторе (на входе в бойлер), кг/см²	Δp	0,4	$\sim 0,05 p$
2. Средняя нагрузка регулируемых отборов, %	$\delta D_{\text{п}}$ $\delta D_{\text{т}}$	60 40	
3. Минимальные потери от дросселирования пара и охлаждения нагретой воды в схеме, на излучение, продувки, параметры и расход пара на собственные нужды	$\Delta Q_{\text{п}}$		Минимум
VI. Установка в целом			
1. Удельный расход тепла на выработку электроэнергии при номинальной или характерной длительной нагрузке (при условиях гарантий или имеющейся тепловой характеристики), ккал/квт·ч	q		Данные гарантий или тепловой характеристики
2. Удельная теплофикационная выработка электроэнергии при условиях, указанных в п. 1, квт·ч/Мккал	η		То же

ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Журнал наблюдений является важнейшим техническим документом испытания.

Наблюдатель во время испытания обязан:

1. До начала опыта заполнить журнал по образцу: вписать фамилию наблюдателя и дату испытания; номера: ТЭС, агрегата, опыта, журнала наблюдений, пунктов измерений, приборов; обозначение измеряемой величины, глубину погружения ртутных термометров в гильзу по шкале в °C.

2. Ознакомиться со шкалой прибора. Наименьшее деление шкалы может быть: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 [°C; атм; мм].

3. Во время отсчета показания прибора расположить глаз на перпендикуляре к плоскости шкалы в месте отсчета.

4. Отсчет начинать в момент подачи сигнала и производить его с точностью 0,1—0,5 наименьшего деления шкалы (см. п. 5). Для ослабления вибрации прибора во время отсчета разрешается придерживать его рукой. К термометрам прикасаться воспрещается.

5. Запись показаний приборов производить чернилами или простым (не химическим) карандашом, четко, тремя знаками (например 12,9; 168; 3,20) в соответствующих строках журнала в порядке их номеров. Запись по сигналу обязательна и при неизменных показаниях прибора. Снятие показаний электросчетчика и отсчет времени по секундомеру в начале и в конце опыта производить в момент появления целой цифры.

6. У жидкостных приборов (дифманометра, U-образного манометра, барометра):

а) отсчет уровня ниже нуля шкалы записывать со знаком минус (—), выше нуля — со знаком плюс (+);

б) при колебаниях уровня ртути быстро оценить средний уровень в левом и правом стеклах, после чего записать оба показания;

в) при появлении воды над поверхностью ртутного столбика записывать отдельно высоту столбика ртути и воды и сообщить об этом руководителю;

г) записать высоту мениска и внутренний диаметр стеклянных трубок.

Отсчет по шкале с нониусом, а также по другим шкалам поясняется наблюдателю на рабочем месте.

7. Записи производить в порядке расположения граф слева направо.

8. После записи быстро по прибору проверить ее правильность.

9. Неправильную запись зачеркнуть (не стирать), а правильную написать рядом или в графе примечаний.

10. В случае замены прибора во время опыта отметить начало записей по новому прибору и его номер.

11. О всех ненормальностях и повреждениях приборов немедленно сообщить руководителю испытания или его помощнику, например: прибор отключен — его показания совершенно неизменны, показания резко изменились (более чем на $\pm 5\%$ или величины, указанной руководителем испытания), сильно колеблются, плохое освещение, не слышен сигнал и др.; сделать пометку в журнале наблюдений.

12. Во время опыта без разрешения руководителя или его помощника не отлучаться от рабочего места, не отвлекаться на другие занятия, не читать.

13. По окончании опыта журнал подписать и сдать руководителю испытания.

14. В промежутках между опытами по указанию руководителя производить подсчет средних значений записей за прошлые опыты.

Для одновременной записи показаний приборов устанавливаются следующие сигналы:

а) за 3—5 мин до начала опыта и по окончании его подается ряд коротких сигналов; время опыта назначает руководитель испытания;

б) для отсчета и записи подаются один короткий сигнал через 1 мин и два коротких сигнала через 5 мин.

Отдельные наблюдатели ведут записи по часам, сверенным с руководителем испытания. Период записей различных величин указывается в образце журнала наблюдения (подчеркнутые величины — через 1 мин, а неподчеркнутые — через 5 мин).

Правила техники безопасности

1. Не трогать никаких деталей оборудования (кнопок, маховиков, рычагов, кранов, электропроводки и т. п.).

2. Не находиться против фланцевых соединений, под поднятым грузом, вблизи горячих неизолированных поверхностей, водомерных колонок и сливных воронок.

3. Не вставать на перила, на плохо закрепленные лестницы и подставки, не работать на высоте без ограждений.

4. Не бегать; обходить скользкие места, покрытые маслом, водой, а также места, огражденные для производства ремонтных и других работ.

5. Не курить и не допускать открытого огня в машинном зале, за исключением специально отведенных мест, указанных руководителем испытания.

6. К открытой ртути не прикасаться.

7. Показания дифманометров при избыточном давлении более 5 атм наблюдать через прозрачные щитки.

8. В промежутках между опытами находиться в пределах территории, указанной руководителем.

9. Нарушения правил техники безопасности недопустимы.

10. Если наблюдатель замечает угрозу безопасности кого-либо из участников испытания, он обязан немедленно сообщить об этом руководителю испытания.

Инструктаж проводили _____ « _____ » 19 _____ г.

Руководитель испытания _____ Представитель ТЭС _____

Инструктаж прошли (подписи):

ПРИЛОЖЕНИЕ 3-21

Список имущества ЭЛ, отправляемого на ТЭС

№ пп.	Наименование	Размер, номер	Количество	Примечание

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИСПЫТАНИЯ

4-1. СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Экспериментальная часть испытания заключается в проведении опытов по согласованной с ТЭС программе, которая должна точно выполняться в отношении режимов нагрузки, условий работы установки и измерений.

При проведении опытов исключительно важно обеспечить постоянное давление свежего пара перед измерительной диафрагмой (соплом) или перед стопорным клапаном с отклонениями до $\pm 0,5\%$ от значения, принятого в условиях характеристики. Для этого у задвижки на паропроводе до указанных пунктов ставят специального дежурного, который на манометру, измеряющему давление перед стопорным клапаном с учетом поправок, поддерживает заданное давление.

В котельной давление должно быть на 3—5% выше нормального.

Таким же путем поддерживают постоянный расход питательной воды близким к расходу свежего пара с отклонениями до $\pm 1\%$.

В результате строгой регулировки показания многих приборов во время опыта не изменяются (давление по ступеням турбины, температура питательной воды и др.); уменьшаются ошибки от неодновременности отсчетов и самих отсчетов показаний; упрощается подсчет средних значений за опыт, тем более при сокращении числа записей (практически одинаковых); упрощается приведение опытных данных к условиям характеристики.

Нетрудно также (особенно в зимнее время) путем изменения расхода охлаждающей воды сохранять неизменным по условиям характеристики и давление в конденсаторе. Характеристики же конденсатора могут быть полу-

чены путем проведения специального несложного испытания.

В опытах при чисто конденсационном режиме нагрузки, связанных с тарировкой диафрагмы (сопла) на свежем паре, следует принять все меры для достижения постоянства расхода конденсата. Эти меры (переход с одного насоса на другой, отключение или, наоборот, включение регулятора уровня в конденсаторе, включение рециркуляции при малых расходах, работа с повышенным уровнем или без него, с прикрытой задвижкой на нагнетании) выявляют еще в период подготовки испытания.

При ручном регулировании рекомендуется установить по приборам расход конденсата, близкий к расходу пара, и плавно изменять его лишь при значительных изменениях уровня в конденсаторе и к концу опыта.

4-2. ОБЯЗАННОСТИ РУКОВОДИТЕЛЯ ИСПЫТАНИЯ

Руководителю испытания с его помощниками на отдельных этапах проведения экспериментальной части испытания необходимо:

за три-пять дней до начала испытания:

1) лично убедиться в следующем:

а) требуемые условия работы, режимы нагрузки установки и их контроль во время опытов практически выполняемы (по приложению 3-16);

б) установка исправна — при данном режиме нагрузки фактические показатели незначительно отличаются от имеющихся характеристик и норм (по приложению 3-19); отсутствуют или выявлены недостатки в работе установки (см. § 1-3);

в) измерительные приборы установлены правильно, показания основных и дублирующих приборов совпадают, весовой баланс пара — воды по приборам сводится удовлетворительно (по приложению 3-17);

2) согласовать с ТЭС и ДС даты и часы проведения опытов по календарному плану испытания (см. приложение 3-1, разд. 5); при этом необходимо:

а) исключить, по возможности, проведение испытания в ночное время;

б) отнести начало опытов от периода смены дежурного персонала;

в) учесть характер графика нагрузки станции — максимум, минимум, воскресные дни, плановый ремонт оборудования; снижение температуры питательной воды и ограничение мощности в опытах с отключенной системой регенерации и другие отклонения от нормального режима работы;

г) предусмотреть остановку и холостой ход турбины, режимы пробных опытов, промежутки между опытами (до 1 часа), а также перерыв в один-два дня между пробными и основными опытами; слив конденсата в опыте холостого хода.

Время проведения опытов уточняется каждый раз при оформлении заявки ДС на испытание, а также в ходе испытания в зависимости от обстоятельств;

3) составить с ТЭС акт о необходимых отклонениях от ранее согласованной программы и неисправностях установки;

4) проверить наличие:

а) распоряжения главного инженера ТЭС о проведении испытания и выделения ответственного представителя — у дежурного инженера станции (ДИС);

б) заявки ДС на испытание и ее содержание (у ДИС);

в) программы испытания с тепловой и электрической схемами (ДИС, ДС);

г) одного-двух помощников, наблюдателей (в том числе электриков), резерва из одного-двух человек, механика для обслуживания приборов; круглосуточных пропусков для всех участников испытания;

д) сигнализации, освещения, связи, площадок, табуреток, скамеек у пунктов измерений и их соответствие правилам безопасности;

е) образцов журналов наблюдений, их общего списка и других вспомогательных материалов (см. 3-5).

Перед началом испытания:

1) уточнить обязанности помощников по проверке тепловой схемы, контролю режима, условий опытов и измерений, а также по инструктажу наблюдателей, сохраняя за собой лишь настройку режима, общее наблюдение за ходом опыта и анализ его результатов;

2) собрать и кратко проинформировать наблюдателей о характере и длительности предстоящих опытов; предупредить наблюдателей о том, что они обязаны немедленно сообщать руководителю испытания о недопустимых

отклонениях величин, особенно по условиям и режиму данного опыта;

3) включить все измерительные приборы и убедиться в их исправности; обратить внимание на приборы (ртутные манометры, термометры), которые могут пострадать во время настройки режима; произвести анализ конденсата из конденсатора для контроля присосов сырой воды. Тщательно проверить герметичность трубок и коренных вентилях, особенно у расходомерных диафрагм (и сопел) на линиях перегретого пара (приближением руки или листа бумаги) и на линиях, находящихся под вакуумом, где на расстоянии неплотности незаметны; прососать трубки на вакууме; все самопишущие приборы, в том числе расходомеры, проверить на нуль;

4) установить через представителя ТЭС и ДИС условия и режим работы для данного опыта и сообщить сигнальщику время начала опыта. Режим очередного опыта можно сообщить ДИС, а затем машинисту турбины в виде отдельного задания по примерной форме, приведенной в приложении 3-18;

5) по сигналу отметить момент начала опыта и его номер на самопишущих приборах; записать уровень конденсата в конденсаторе и других емкостях, показания электросчетчиков и иных суммирующих приборов; включить эти величины в журналы наблюдений; для сигнала можно использовать сирену, электрические звонки, лампы с замыканием тока от часов или от синхронного двигателя.

В течение опытов:

1) проверять соблюдение условий, режимов и выполнение измерений по пунктам приложения 3-16; в случае невозможности их обеспечения, с участием ДИС и главного инженера ТЭС принимать решение о продлении опыта или о его прекращении;

2) в момент проверки записей делать в журнале у наблюдателя пометку о их правильности (не менее двух раз в течение опыта);

3) обязательно убедиться в правильности основных результатов опыта (по трем-пяти первым записям, по средним величинам за прошлый опыт): весового баланса пара, конденсата и питательной воды, баланса мощности в опытах без отборов пара (см. стр. 244), показателей экономичности элементов установки (см. приложение 3-19); нанести опытные данные на графики с уче-

том основных поправок (по приложению 3-8); незакономерное выпадение точки указывает на ошибку измерения (см. ниже);

4) заполнить журнал руководителя испытания, отметить возникающие в ходе опыта неясности, замечания и соображения по исключению ряда записей при их обработке и определению границ опытов (см. приложение 3-16);

5) бегло просмотреть журналы предыдущего опыта и сравнить между собой записи одноименных величин в журналах смежных опытов.

В конце опыта:

1) по сигналу окончания опыта сделать отметку на самописцах, записать уровни конденсата в конденсаторе и других емкостях, показания электросчетчиков и иных суммирующих приборов (отключить их);

2) при больших перерывах между опытами отключить приборы;

3) проверить содержание заявки ДС на проведение опытов следующего дня и ее разрешение; подготовить для этого все необходимое.

По окончании испытания:

1) составить совместно с ТЭС акт об отклонениях от программы во время опытов, об отсутствии замечаний в отношении выполнения всей экспериментальной части испытания;

2) составить предварительное заключение о показателях работы установки и ее элементов;

3) произвести повторную тарировку всех измерительных приборов и проверку плотности теплообменников и арматуры с оформлением протоколов;

4) демонтировать, очистить и подготовить к отправке все имущество и приборы ЭЛ с проверкой по ранее составленному списку.

6. Проверка правильности результатов испытания.

Проверку величин D_{1x} и N_x , приведенных с учетом основных поправок к условиям характеристики, лучше всего производить путем рассмотрения их графического изображения.

1. Если для турбины без регулируемых отборов на характеристике $D_{1x} = f(N_{yx})$ опытная точка резко выпадает, то, если ошибочна величина D_1 , эта точка одновременно выпадает на характеристиках

$$D_{1x} = f(z^{cm}) \text{ и } p_x^{pc}, \text{ или } p_x^{lo} = f(D_{1x}).$$

Кроме того, показания основного и независимого дублирующего приборов могут быть различны; если же величина D_1 правильна, то ошибочна величина N , (когда все условия характеристики соблюдены и выпадение точки незакономерно).

2. Момент открытия перегрузочного, а также очередного клапана должен одновременно отражаться на характеристиках

$$z^{кл} = f(z^{см}), p_2^{кл} = f(D_{1х})$$

и, возможно, на характеристике

$$D_{1х} = f(N_{эх})$$

3. Расход пара через ч. с. д. и ч. н. д. можно контролировать по положению опытных точек на графиках

$$D_{1х} = f(z^{см})$$

для данной части с учетом давления пара на входе.

Совмещение характеристик $(z^{кл}, p_2^{кл}, D_1) = f(z^{см})$ облегчает анализ и взаимную проверку этих величин, поскольку ход сервомотора, подъем клапанов (с увеличением их проходного сечения), расход пара через клапаны и давление за ними изменяются одновременно.

4. Давление за закрытым регулирующим клапаном при отсутствии пропуска пара близко к давлению в регулирующей ступени.

5. Линия процесса на $i-s$ диаграмме для любого отсека проточной части не должна быть вертикальна или отклоняться от адиабаты влево (при этом $\eta_{во} \geq 1$). Кроме того, следует сравнить: давление и температуру пара в камерах отборов и перед подогревателями; температуру насыщения пара с температурой дренажа и воды на выходе из подогревателей и т. п. (см. приложение 3-17).

ГЛАВА ПЯТАЯ

СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА ОБ ИСПЫТАНИИ

5-1. ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

1. Абсолютная и относительная погрешности величин

Результатом испытания являются приближенные значения физических величин, полученные путем измерений и вычислений.

Отклонение результата от искомого истинного значения величины составляет погрешность, или ошибку, которую необходимо оценить при любом испытании, руководствуясь приведенными ниже (без доказательств) положениями теории погрешностей.

Истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, поскольку всякое измерение содержит некоторую ошибку.

Наиболее достоверным является среднеарифметическое значение ряда измерений данной величины, произведенных с одинаковой точностью. Чем больше число измерений и меньше их ошибка, тем ближе к истинному среднеарифметическое значение всех измерений, т. е. меньше ошибка их результата.

Ошибка косвенного измерения величины зависит от формулы закономерной связи ее с другими величинами и от ошибок их измерения.

Если обозначить через x неизвестное истинное значение величины, а результат ее измерения — через a , то основные виды погрешностей можно представить так, как это показано ниже.

1. Абсолютная погрешность результата:

$$\Delta a = a - x.$$

2. Относительная погрешность результата:

$$\delta_a = \frac{\Delta a}{x},$$

или, поскольку $a \approx x$,

$$\delta_a = \frac{\Delta a}{a}.$$

Относительная погрешность δ_a тем больше, чем меньше величина a при данном значении Δa . Например, если по манометру $a_1 = 5 \text{ ати}$ и $a_2 = 20 \text{ ати}$, то при $\Delta a_1 = \Delta a_2 = 0,5 \text{ ати}$

$$\delta_{a_1} = \frac{0,5}{5} = 0,1; \quad \delta_{a_2} = \frac{0,5}{20} = 0,025.$$

Относительные погрешности различных приближенных величин можно сравнивать между собой и суммировать при определении погрешности конечного результата.

3. Относительная погрешность суммы (косвенной величины):

$$\delta_{a_1+a_2} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2}{a_1 + a_2}.$$

4. Относительная погрешность разности:

$$\delta_{a_1-a_2} = \frac{\Delta a_1 - \Delta a_2}{a_1 - a_2}.$$

В пп. 3 и 4 $a_1 \pm a_2$ может означать, например, расход пара по сумме или разности показаний двух расходомеров.

Погрешность $\delta_{a_1-a_2}$ велика при a_1 , близком к a_2 , даже при малых значениях, но разных знаках Δa_1 и Δa_2 , например:

$$a_1 = 100 \text{ т/ч}; \quad a_2 = 98 \text{ т/ч};$$

$$\Delta a_1 = 0,1 \text{ т/ч} \text{ или } \delta_{a_1} = 0,001;$$

$$\Delta a_2 = -0,1 \text{ т/ч} \text{ или } \delta_{a_2} \approx -0,001;$$

$$\delta_{a_1-a_2} = \frac{0,1+0,1}{100-98} = 0,1, \text{ или } 10\%.$$

5. Относительная погрешность произведения:

$$\delta_{a_1 a_2} = \delta_{a_1} + \delta_{a_2}.$$

6. Относительная погрешность частного:

$$-\delta_{a_1/a_2} = \delta_{a_1} - \delta_{a_2}.$$

7. Относительная погрешность степенного выражения:

$$\delta_{a_1^m/a_2^n} = m\delta_{a_1} - n\delta_{a_2}.$$

В пп. 5, 6 и 7 обозначено:

m и n — любое целое или дробное, положительное или отрицательное число;

δ_{a_1} и δ_{a_2} — со знаками плюс или минус соответственно знаку абсолютных погрешностей Δa_1 и Δa_2 .

Погрешность результата зависит в основном от погрешности наиболее грубого измерения, например:

$$\delta_{a_1} = +0,02; \quad \delta_{a_2} = -0,002;$$

$$\delta_{a_1/a_2} = 0,02 + 0,002 = 0,022.$$

2. Погрешности измерений

Погрешности измерений делят на три группы:

1) систематические погрешности, — сохраняющиеся при повторных измерениях с постоянным знаком (+) или (—); эти погрешности устраняют введением поправок на окружающие условия, расположение прибора и др.;

2) грубые ошибки, или промахи — явно неверная запись по вине наблюдателя или из-за неисправности прибора; промахи исключают;

3) случайные погрешности — неизвестные, переменные по величине и знаку, возникающие из-за неточности отсчета, периодичности отсчета переменной величины, вариации прибора, т. е. разных показаний при измерениях одного и того же значения, и др.

Точность результата измерений определяют с учетом только случайных относительных погрешностей, значение которых вычисляют приближенно, условно, как наиболее вероятные с равноправными знаками ($\pm$).

Предельная, или максимальная допустимая относительная погрешность

показания измерительного прибора $S_{A_{\max}}$ в процентах от диапазона шкалы $A_{\max}$ численно равна его классу (см. § 2-1); а в процентах от измеряемой величины A равна:

$$S_A = \frac{S_{A_{\max}} A_{\max}}{A} [\%]$$

и, следовательно, возрастает с уменьшением измеряемого значения A .

Действительная погрешность прибора может быть меньше обозначаемой классом, а в случае тарировки она приближается к сумме вариации прибора и погрешности (класса) эталона, служащего для проверки.

Погрешность отсчета при устойчивых показаниях прибора полагают равной 0,2—0,5 наименьшего деления шкалы.

3. Погрешности косвенного измерения

Ряд величин — теплосодержание, расход пара, воды и др. — измеряют косвенным путем, т. е. вычисляют на основании прямых измерений других величин (давления, температуры) и существующей между ними закономерной зависимости.

Погрешность косвенного измерения зависит от погрешности измерения исходных величин и формулы подсчета (см. пример на стр. 226).

4. Погрешности вычислений

Источником погрешностей вычисления является употребление приближенных формул подсчетов и табличных данных, например удельного веса пара, числа $\sqrt{3}$ по таблицам, округлений при подсчетах, формул приведения к условиям характеристики и др.

Погрешности вычислений обычно несоизмеримо малы по сравнению с погрешностями измерений. Так, при погрешности наименее точного измерения, равной 0,02, значение $\sqrt{3}$, если оно входит в формулу, округляют до 1,73, т. е. с погрешностью

$$\frac{1,7320 - 1,73}{1,7320} = 0,0011.$$

Промежуточные вычисления сокращают с сохранением числа знаков на один-два больше, чем нужно по точности для конечного результата.

Число знаков определяется числом всех цифр кроме нулей слева в десятичной дроби:

3,141 — четыре знака;

21 600 — пять знаков;

0,0120 — три знака.

В приближенных числах все цифры верны за исключением последней, округляемой с погрешностью не более 0,5 единицы.

Таким образом, относительная погрешность приведенных трех чисел в процентах составляет:

$$\frac{0,5 \cdot 100}{3141} = 0,016; \quad \frac{0,5 \cdot 100}{21600} = 0,0023; \quad \frac{0,5 \cdot 100}{120} = 0,42.$$

Для упрощения вычислений пользуются логарифмической линейкой (точность $\pm 0,3\%$) и графическим методом при достаточном масштабе.

Наибольшую точность дают счетные машины и математические таблицы.

Результат каждого действия при вычислениях проверяют путем повторения или обратного действия и вписывают в специальную форму с расположением граф в порядке вычисления. Там же указывают формулы вычисления — см., например, приложение 5-4.

При выборе метода определения или измерения искомой величины следует оценить его погрешность в отношении получаемого конечного результата. Всякое упрощение вычислений (или измерений) рационально, если вызываемая им ошибка конечного результата проверена и мала — не более 0,1 ошибки измерения или допустимой ошибки.

5. Определение погрешностей результата

Общую погрешность результата испытания составляют:

а) погрешности в соблюдении условий испытания — неучтенные утечки и отклонения в тепловой схеме, колебания параметров пара и воды, тепловая инерция установок;

б) погрешность измерений;

в) погрешности методов подсчета величин при косвенных измерениях и приведения опытных величин к условиям характеристики;

г) погрешности графического построения характеристики.

Все погрешности, кроме погрешностей измерений, следует отнести к систематическим, они подлежат исключению либо должны быть ничтожны.

Точность результата измерений характеризуется его среднеквадратичной погрешностью σ .

Кроме того, определяют предельную погрешность, которую считают равной $S = 3\sigma$, а вероятность ее появления оценивают в 0,3%.

Определение указанных погрешностей рассмотрено ниже.

В отношении погрешностей различают две категории величин:

1) величины, получаемые в результате большого числа измерений одного и того же истинного их значения;

2) величины, получаемые путем однократного измерения.

К первой категории относятся величины, принимаемые по таблицам, например коэффициент расхода α диафрагмы, удельный вес пара, воды и др., полученные путем обработки данных многочисленных измерений. Для них известна среднеквадратичная и предельная погрешности.

Для величин второй категории известна лишь максимальная (допустимая) погрешность S однократного измерения, соответствующая классу точности прибора, с учетом погрешности отсчета.

С некоторым приближением среднеквадратичную погрешность считают равной одной трети этой максимальной или предельной погрешности измерения.

При многократном измерении постоянного значения величины среднеквадратичную погрешность одного из n одинаково точных измерений определяют по отношению к их среднеарифметическому значению из выражения

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-1}},$$

где $\delta = \frac{\Delta a}{A}$ и $\Delta a = a - A$ — относительная и абсолютная погрешности одного измерения a против среднеарифметического A из всех измерений:

$$A = \frac{\sum a}{n}.$$

Предельная погрешность одного из n измерений: $S = 3\sigma$.

Среднеквадратичная и предельная погрешности результата многократных измерений, т. е. их среднеарифметического значения, определяются из следующих выражений:

$$\sigma_n = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n(n-1)}}; \quad S_n = 3\sigma_n.$$

Если же известна среднеквадратичная (σ) или предельная (S) погрешность отдельного измерения (например для величин второй категории — см. выше), то

$$\sigma_n = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{S}{3\sqrt{n}}; \quad S_n = \frac{S}{\sqrt{n}} = \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}.$$

В общем виде погрешности величины, измеряемой косвенным путем, т. е. определяемой в зависимости от ряда величин первой и второй категорий при однократном измерении, равны:

среднеквадратичная относительная погрешность

$$\sigma_{\text{рез}} = \pm \sqrt{\sum \sigma^2 + \frac{1}{9} \sum S^2},$$

где σ — среднеквадратичные относительные погрешности величин первой категории;

S — предельные относительные погрешности величин второй категории;

предельная погрешность

$$S_{\text{рез}} = 3\sigma_{\text{рез}}.$$

Те же погрешности при многократном измерении равны:

$$\sigma_n = \pm \frac{\sigma_{\text{рез}}}{\sqrt{n}}; \quad S_n = \pm \frac{S_{\text{рез}}}{\sqrt{n}}.$$

При определении погрешности результата полагают, что погрешности отдельных измерений имеют наименее благоприятный знак, т. е. суммируют их арифметически.

В условиях испытания паротурбинной установки все измеряемые величины в ходе опыта непостоянны и относятся ко второй категории.

Формулы теории погрешностей применимы только для случайных погрешностей, т. е. при условии исключения систематических погрешностей (путем поправок) и промахов, и для числа измерений, равного и больше десяти.

6. Примеры определения погрешности результата испытания

Пример. В соответствии с данными, приведенными на стр. 101, имеем:

предельная относительная погрешность измерения мощности $\pm 0,2\%$;

предельная относительная погрешность измерения расхода свежего пара $\pm 0,2\%$;

предельная абсолютная погрешность измерения теплосодержания пара ($i_1 = 750$ ккал/кг) составляет $\pm 0,3$ ккал/кг;

предельная абсолютная погрешность измерения теплосодержания питательной воды ($i_{\text{пит}} = 150$ ккал/кг) равна $\pm 0,2$ ккал/кг.

Определяем погрешность одного измерения удельного расхода тепла q_1 при данных условиях.

1. Формула для определения удельного расхода тепла

$$q_1 = \frac{Q_1}{N_3} = \frac{D_1 (i_1 - i_{\text{пит}})}{N_3}.$$

2. Предельная относительная погрешность величины $(i_1 - i_{\text{пит}})$ теплоиспользования пара

$$S_i = \pm \frac{(\Delta i_1 + \Delta i_{\text{пит}}) \cdot 100}{i_1 - i_{\text{пит}}} = \pm \frac{(0,3 + 0,2) \cdot 100}{750 - 150} = \pm 0,08\%.$$

3. Среднеквадратичная относительная погрешность величины q_1 для однократного измерения

$$\sigma_q = \frac{1}{3} \sqrt{S_N^2 + S_D^2 + S_i^2} = \\ = \frac{1}{3} \sqrt{0,2^2 + 0,2^2 + 0,08^2} = \pm 0,1\%.$$

4. Предельная относительная погрешность величины q_1

$$S_q = (\pm 3 \cdot 0,1) = \pm 0,3\%.$$

В табл. 5-1 приведены результаты подсчета относительной погрешности опытных и приведенных величин удельного расхода пара и тепла за счет погрешностей измерений для конденсационной установки типа ВК-50 при полной нагрузке. Погрешность измерения всех величин принята одинаковой, равной $\pm 1\%$.

Среднеквадратичная погрешность приведенного значения удельного расхода тепла q_{1x} получена равной $\pm 0,62\%$, а предельная погрешность $\pm 1,86\%$.

Наиболее значительными являются погрешности (предельные) величины q_{1x} за счет измерений:

расхода пара, %	$\pm 1,40$
мощности, %	$\pm 1,0$
температуры свежего пара, %	$\pm 0,60$
температуры питательной воды, %	$\pm 0,40$

При обычном в практике испытаний числе измерений главных величин, равном тридцати (не менее) погрешности величины q_{1x} в табл. 5-1 составляют:

$$\sigma_{q_{1x}} = \frac{0,62}{\sqrt{30}} = \pm 0,11\%; \quad S_{q_{1x}} = 3 \cdot 0,11 = \pm 0,33\%.$$

В дополнение к данным табл. 5-1 следует заметить, что погрешность $\pm 1^\circ$ С измерения температуры воды, как и $\pm 3\%$ ее расхода, в любом подогревателе, кроме последнего по ходу воды, вызывает погрешность приведенной величины удельного расхода тепла $\delta_{q_{1x}} \approx \pm 0,05\%$, совершенно не влияя на опытное его значение.

Ошибка в $\pm 1^\circ$ С при измерении температуры пара отбора также не влияет на опытную величину удельного расхода тепла и ведет к ошибке приведенной его величины в размере, соответствующем ошибке в мощности установки около $\pm 0,5$ квт на 1 м отбора при неизменном расходе тепла, т. е. практически ничтожной.

Метод вычисления погрешностей, приведенных в табл. 5-1, можно показать на примере ошибки в измерении расхода свежего пара.

Пусть $\delta D_{1\text{оп}} = +0,01$; тогда

$$\delta d_{1\text{оп}} = \delta \frac{D_{1\text{оп}}}{N_{3\text{оп}}} = \delta D_{1\text{оп}} - \delta N_{3\text{оп}} = +0,01,$$

поскольку

$$\delta N_{3\text{оп}} = 0.$$

Таблица 5.1

Пример определения относительной погрешности опытных и приведенных величин удельного расхода пара d_1 и тепла q_1 за счет погрешностей измерения для конденсационной установки типа ВК-50

№ пп	Наименование измеряемых величин	Обозначение величин	Действительные значения	Предельная погрешность измерения		Относительная погрешность опытных величин, %				Относительная погрешность приведенных величин, %			
				относительная, %	абсолютная Δ	$S_{D_{1оп}}$	$S_{p_{1оп}}$	$S_{D_{1оп}}$	$S_{p_{1оп}}$	$S_{D_{1оп}}$	$S_{p_{1оп}}$	$S_{D_{1оп}}$	$S_{p_{1оп}}$
1	Мощность генератора	$N_{э}$	50 000 кВт	$\pm 1,00$	± 500 кВт	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$
2	Расход свежего пара	D_1	220 т/ч	$\pm 1,00$	$\pm 2,2$ т/ч	0	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$
3	Расход питательной воды	$G_{пит}$	220 »	$\pm 1,00$	$\pm 2,2$ »	0	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$	0	$\pm 1,00$
4	Давление свежего пара	p_1	90 атм	$\pm 1,00$ *	$\pm 0,9$ атм	0	0	0	0	$\pm 1,02$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$
5	Температура свежего пара	t_1	500° С	$\pm 1,00$ *	± 5 ° С	0	0	0	0	$\pm 1,02$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$
6	Давление выхода пара	p_2	0,05 атм	$\pm 1,00$	$\pm 0,4$ мм рт. ст.	0	0	0	0	$\pm 1,02$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$
7	Температура питательной воды	$t_{пит}$	220° С**	$\pm 1,00$	$\pm 2,2$ ° С	0	0	0	0	$\pm 1,02$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$
8	Коэффициент мощности	$\cos \phi$	0,8	$\pm 1,00$	—	0	0	0	0	$\pm 1,02$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$

* Величины p_1 и t_1 перед стопорным клапаном; погрешности их измерения перед диафрагмой (соплом) включены в п. 2 (D_1).

** $t_{пит} = 226$ ккал/кг.

Примечание. Среднеквадратичная относительная погрешность величины $q_{1х}$:

$$\sigma_{q_{1х}} = 1/3 \sqrt{1^2 + 1,40^2 + 0,10^2 + 0,02^2 + 0,60^2 + 0,05^2 + 0,40^2 + 0,01^2} = \pm 0,62\%.$$

Предельная погрешность величины $q_{1х}$:

$$S_{q_{1х}} = \pm 3 \cdot 0,62 = \pm 1,86\%.$$

Соответствующие погрешности опытной величины $q_{1оп}$ имеют те же значения.

Погрешность

$$\begin{aligned} \delta Q_{1оп} &= \delta (D_{1оп} i_{1оп} - G_{питоп} i_{питоп}) = \\ &= \frac{\Delta (D_{1оп} i_{1оп}) - \Delta (G_{питоп} i_{питоп})}{0,99 D_{1оп} i_{1оп} - G_{питоп} i_{питоп}} = \\ &= + \frac{0,01 D_{1оп} \cdot 810}{0,99 D_{1оп} \cdot 810 - D_{1оп} \cdot 226} = \\ &= + \frac{0,01 \cdot 810}{584} \approx + 0,014, \end{aligned}$$

а

$$\delta q_{1оп} = \delta \frac{Q_{1оп}}{N_{эоп}} = + 0,014$$

при условии, что во время опытов соблюдалось условие $G_{пит} = D_{1оп}$; здесь $i_{1оп} = 810$ ккал/кг — теплосодержание свежего пара при $p_{1оп} = 90$ атм и $t_{1оп} = 500$ ° С; $i_{питоп} = 226$ ккал/кг — теплосодержание питательной воды при $t_{питоп} = 220$ ° С. Погрешность всех величин, кроме $D_{1оп}$ равны нулю. Аналогично находим:

$$\delta D_{1х} = \delta \left(D_{1оп} \frac{p_{1х}}{p_{1оп}} \sqrt{\frac{T_{1оп}}{T_{1х}}} \right) = \delta D_{1оп} = + 0,01,$$

так как погрешности других величин, кроме $D_{1оп}$, равны нулю.

Ошибка в измерении величины $Q_{1оп}$ со знаком (+) при истинном значении $N_{эоп}$ ведет к равной по величине и обратной по знаку (—) ошибке в вычислении внутреннего относительного к. п. д. проточной части как в условиях опытов, так и в условиях характеристики. С другой стороны, приведенная мощность окажется завышенной вследствие увеличенного расхода свежего пара, и в результате относительная ошибка $\delta N_{эх} = 0$. Так, например, при $p_{1х} = p_{1оп}$, $T_{1х} = T_{1оп}$, $p_{2х} = p_{2оп}$ и др. получаем:

$$D_{1х} = D_{1оп}, G_{питх} = G_{питоп};$$

все другие величины в условиях характеристики равны их опытным значениям, включая $N_{эх} = N_{оп}$, и, следовательно,

$$\delta Q_{1х} = \delta Q_{1оп} = + 0,014; \delta q_{1х} = \delta q_{1оп} = + 0,014.$$

Надо обратить внимание на некоторое уменьшение ошибки δQ_{1x} за счет расхода питательной воды, отклонение которого от истинного значения при соблюдении условия $G_{\text{пит}} = D_1$ равно по величине и знаку ошибке $\delta D_{1\text{оп}}$. Однако эта «режимная» поправка составляет около 0,02 основной ошибки δQ_{1x} и δq_{1x} .

Данные приведенного примера позволяют судить о необходимой точности измерения отдельных величин, исходя из их влияния на величину погрешности конечного результата.

Наиболее важным и трудным делом является исключение систематических однозначных погрешностей. Уменьшению погрешностей способствуют: тарировка измерительных диафрагм и других приборов, применение баков, точных самопишущих и, особенно, суммирующих приборов, обеспечение устойчивости измеряемых величин, многократное дублирование измерений, тщательная проверка тепловой схемы и других условий в ходе опытов.

Из-за неучтенных систематических погрешностей действительная погрешность результата может быть намного больше вычисленной по приведенным выше формулам.

7. О графическом изображении результатов испытания

Результаты испытания в виде зависимости одних величин от других изображают графически в системе прямоугольных координат на миллиметровой бумаге. Точки отдельных опытов соединяют прямой или кривой с учетом характера данной зависимости. На кривой точки должны быть близки друг к другу для уменьшения ошибки от интерполяции.

Экстраполяция, т. е. продолжение кривой за пределы расположения опытных величин, как правило, не рекомендуется. В отдельных случаях экстраполяция уместна; если возможная по характеру кривой наибольшая погрешность допустима.

Закономерность каждого получаемого графика тщательно изучают.

Выпадение точки за пределы точности измерений указывает на чрезмерную ошибку измерения и вычисления либо на отклонение от установленного процесса работы установки. В таком случае требуется проверка первичных

записей, всего хода вычисления и, кроме того, обоснованное заключение.

Масштаб диаграмм выбирают удобным для отсчета (1; 2; 5; 10) и в 10 раз большее число единиц шкалы в одной клетке любого размера, достаточного для требуемой точности определения данной величины.

8. Требуемая точность результатов испытания

Как указывалось выше, точность или средняя квадратичная погрешность результата испытания по расходу пара и тепла для современных крупных турбин должна быть около $\pm 0,5\%$ при полной нагрузке, что при тщательном проведении испытания и применении измерительных приборов требуемого класса точности практически достигается.

С уменьшением нагрузки относительная погрешность измерения ряда величин возрастает, так как их абсолютная погрешность остается неизменной (см. стр. 222).

5-2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработку результатов измерений производят в следующем порядке:

- 1) разметка границ опытов;
- 2) определение средних за опыт действительных значений измеренных величин;
- 3) определение результатов косвенных измерений;
- 4) приведение опытных величин к условиям характеристики;
- 5) построение графиков тепловых характеристик установки;
- 6) составление отчета об испытании.

1. Разметка границ опытов

Путем тщательного рассмотрения журналов наблюдений, диаграмм самописцев и записей в журнале руководителя испытания выявляют недопустимые отклонения от принятых условий испытания и грубые ошибки в записях по вине наблюдателей или из-за неисправности приборов, не замеченные во время испытания. При этом необходимо просмотреть записи каждой величины от начала

до конца опыта и в случае резких отклонений сверить их с одновременными записями закономерно связанных величин. Например, отклонение давления в третьем отборе сверяют с давлением во втором и первом отборах.

Неправильная запись показаний или знака плюс — минус ($\pm$) по двухстеклольному дифманометру обнаруживается по несоответствию уровней ртути в правом и левом стеклах при разных отсчетах (вследствие разного диаметра стекол изменения уровней могут быть неодинаковы). Например, три записи:

слева	справа
+60	—80
+63	—82
+56	—84

Уровень ртути в правом и левом стеклах должен одновременно увеличиться или уменьшиться, следовательно, третья запись ошибочна.

Отдельные неправильные записи могут быть выявлены и иногда исправлены при помощи контрольного графика зависимости уровней в правом и левом стеклах — $h_{\text{лев}} = f(h_{\text{пр}})$ при условии неизменного заполнения дифманометра ртутью.

Для контроля используют также показания дублирующих приборов.

Участки записей, признанные непригодными, исключают или исправляют, если это допустимо (например ошибки в знаках).

После указанной проверки устанавливают границы каждого опыта, т. е. начало и конец записей, подлежащих обработке, и полностью исключают опыты, не удовлетворяющие условиям испытания.

Затем отмечают в журналах наблюдений величины, не требующие подсчета среднеарифметического значения, например уровень воды в конденсаторе.

2. Определение средних за опыт действительных значений измеренных величин

В журналах наблюдений под среднеарифметическим значением показаний прибора в данном опыте выписывают все существенные поправки, затем алгебраическую сумму показаний и поправок, а также максимум и минимум величин за опыт (см. приложение 3-14). При этом

полагают, что поправка не отличается от своего среднеарифметического значения при ее введении к каждому отсчету. (О поправках см. § 2-3, 2-4 и 2-5).

Если по протоколам тарировки прибора до и после испытания поправки различны, то принимают их среднеарифметическое значение для данного отсчета. При больших отклонениях (выше класса прибора) используют показания дублирующих приборов, либо величину совершенно исключают из отсчета. В ответственных случаях измерения повторяют. Среднеарифметическое значение величины подсчитывают с числом знаков на единицу больше их числа в отсчетах показаний приборов.

Сводная таблица результатов испытания

Средние действительные значения величин являются окончательными. Из вписывают в сводную таблицу результатов испытания, за исключением вспомогательных величин (например перепад давления в диафрагме, температура окружающей среды).

В дальнейшем в сводную таблицу вносят величины, определяемые косвенным путем (см. ниже).

Сводная таблица результатов испытания содержит данные по режиму работы установки во время испытания, параметры и расход всех потоков пара и воды на входе и на выходе у каждого элемента установки и показатели экономичности его работы, а также указания о способе измерения и подсчета величин. При отсутствии регулируемых отборов в таблицу помещают показатели экономичности всей установки при условиях характеристики.

С самого начала необходимо окончательно установить порядковые номера опытов (по сериям опытов, по возрастанию нагрузки и др.). В журналах наблюдений зачеркивают (не стирая) старые номера опытов и записывают новые, окончательные.

В приложении 5-1 приведена форма сводной таблицы, составленной для наиболее сложного типа установки с расчетом на исключение ненужных пунктов.

3. Определение результатов косвенных измерений

Наиболее сложными из косвенных измерений (определений) являются:

а) измерение расхода пара и воды посредством диафрагмы;

б) определение расхода пара по уравнениям теплового баланса теплообменников;

в) определение внутренней мощности отдельных отсеков проточной части турбины и теплосодержания влажного пара на выходе из проточной части.

Ниже показан порядок и способ подсчетов.

а) Измерение расхода пара и воды по диафрагме

Для определения расхода пара, конденсата и питательной воды по диафрагме за время опыта надо подсчитать среднеарифметическую величину корня $\sqrt{h}$ для каждого отсчета перепада давления h по дифманометру. Однако для колебаний расхода в пределах допуска $\pm 7\%$ или перепада $\pm 15\%$ можно считать:

$$\sqrt{\frac{\sum h}{n}} = \sum \frac{\sqrt{h}}{n},$$

где n — число отсчетов за опыт.

При этом ошибка в определении расхода вследствие такой замены не превышает $\pm 0,10\%$, что видно из примера, приведенного в табл. 5-2.

Таблица 5-2

h_2/h_1	0,85	
h_1	25	400
h_2	21,2	340
$\sqrt{\frac{h_1 + h_2}{2}} \cdot \frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}{2}$	1,0007	1,0008
Погрешность, %	0,07	0,08

Примечание. Рассматривается случай равного числа записей h_1 и h_2 .

Если же колебания величин h в течение опыта превышают 15% , что недопустимо, то ошибки от периодичности записей могут быть несоизмеримо больше, чем ошибка от указанной замены.

Расчет по определению расхода производят по форме приложения 5-2, с учетом результатов тарировки диафрагмы.

Для облегчения вычисления удельного веса пара пользуются вспомогательными графиками (рис. 5-1) в большом масштабе, специально составленными по таблицам водяного пара в пределах опытных значений величин давления и температуры.

Удельный вес водяного пара γ и его зависимость от давления p и температуры t сравнительно легко и с точностью до $0,5\%$ можно определить, пользуясь приложением II и логарифмической линейкой, что особенно удобно для ориентировочных расчетов. В частности, при давлении

$$p = 0,01 \div 1 \text{ атм}$$

$$\gamma = 212 \div 214 \frac{p}{t + 273}.$$

В приложении 5-2 проводится сравнение «видимых» расходов по показаниям дифманометра ($G = A_v \sqrt{h}$) и расходомера для расчетных параметров среды. Это не требует никаких поправок к показаниям приборов, если температура ртути в них не отличается более чем на 10°C , а шкала расходомера и высота сменного стакана отвечают расчетным данным.

В случае тарировки диафрагмы на свежем паре по конденсату определяют поправочный множитель для каждого опыта:

$$k' = \frac{G_k}{D_1},$$

после чего по графику $k' = f(D_1)$ принимают среднее значение k' для расчета расхода свежего пара во всех опытах (см. стр. 147, 150).

б) Определение расхода пара по уравнениям теплового баланса теплообменников

Расчет начинают с последнего по ходу воды подогревателя, в который не поступает дренаж из другого подогревателя, и продолжают в направлении, обратном ходу воды.

Формулы расчета составляют в зависимости от тепловой схемы установки во время опытов. Например, для схемы установки типа ВПТ-25 по рис. 5-2:

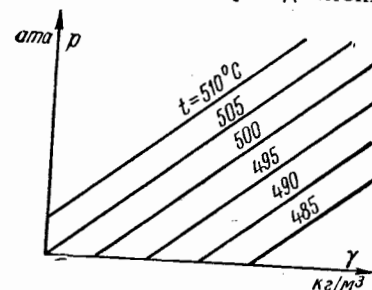
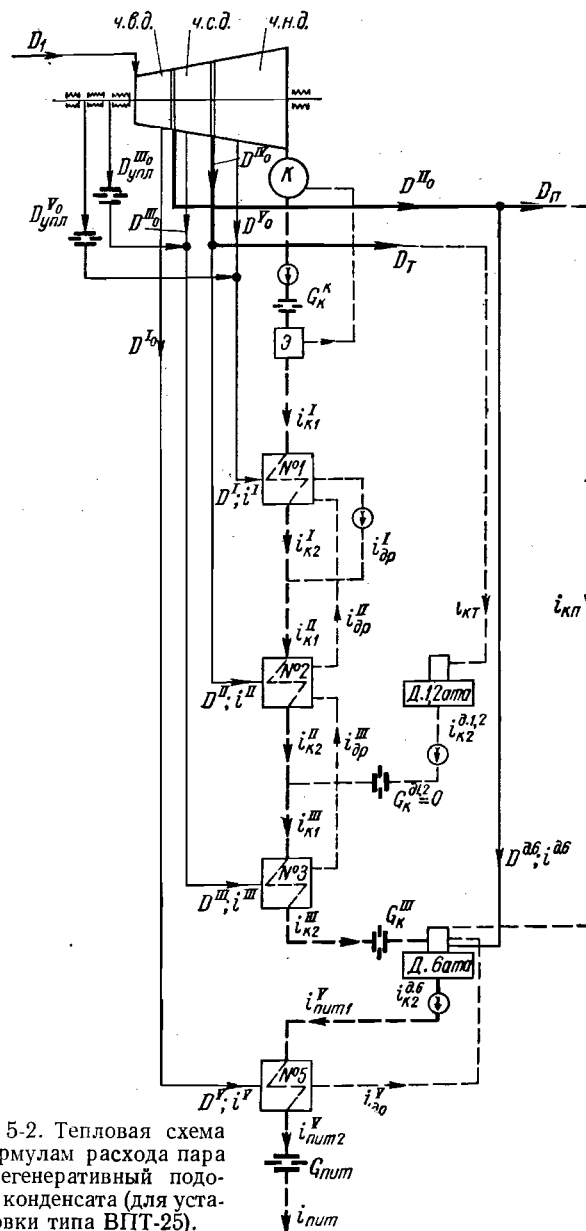


Рис. 5-1. Вспомогательная диаграмма удельного веса пара.



расход пара на подогреватель № 5

$$D^V = \frac{G_{\text{пит}} (i_{\text{пит}2}^V - i_{\text{пит}1}^V) + \Delta Q_{\text{п}}^V}{i^V - i_{\text{нд}}^V};$$

расход пара на деаэратор 6 ата*

$$D_{\text{дб}} = \frac{G_{\text{пит}} i_{\text{к2}}^{\text{дб}} - G_{\text{к}}^{\text{III}} i_{\text{к2}}^{\text{III}} - D^{\text{V}} i_{\text{др}}^{\text{V}} + \Delta Q_{\text{п}}^{\text{дб}}}{i_{\text{к2}}^{\text{дб}} - i_{\text{к2}}^{\text{дб}}};$$

расход пара на подогреватель № 3

$$D^{\text{III}} = \frac{G_{\text{K}}^{\text{III}} (i_{\text{K}2}^{\text{III}} - i_{\text{K}1}^{\text{III}}) + \Delta Q_{\text{II}}^{\text{III}}}{i_{\text{II}}^{\text{III}} - i_{\text{DP}}^{\text{II}}};$$

расход пара на подогреватель № 2

$$D^{\text{II}} = \frac{G_{\kappa}^{\text{III}}(i_{\kappa 2}^{\text{II}} - i_{\kappa 1}^{\text{II}}) - D^{\text{III}}(i_{\text{дp}}^{\text{III}} - i_{\text{дp}}^{\text{II}}) + \Delta Q_{\text{п}}^{\text{II}}}{i^{\text{II}} - i_{\text{дp}}^{\text{II}}};$$

расход пара на подогреватель № 1

$$D^I = \frac{G_K^K (i_{K2}^I - i_{K1}^I) - (D^{III} + D^{II}) (i_{\pi P}^{II} - i_{\pi P}^I) + \Delta Q_{\pi}^I}{i^I - i_{\pi P}^I},$$

расход пара из первого — пятого отборов (различием теплосодержаний пара отборов и из уплотнений пренебрегаем)

$$D^{\text{Io}} = D^{\text{V}}; \quad D^{\text{IIo}} = D_{\pi} + D^{\text{d6}}.$$

$$D^{\text{III}_0} = D^{\text{III}} - D^{\text{III}_0}_{\text{впл}}; \quad D^{\text{IV}_0} = D_{\text{т}} + D^{\text{II}};$$

$$D^{\text{Vo}} = D^{\text{I}} - D_{\text{vпл}}^{\text{Vo}},$$

Величины ΔQ_n потерь тепла от наружного охлаждения подогревателей и их трубопроводов могут быть подсчитаны; обычно их оценивают приблизительно. Например, для подогревателей турбины типа ВК-50 при удовлетворительной тепловой изоляции принимают ΔQ_n :

* На рис. 5-2 температура возврата конденсата в деаэраторы 1,2 и 6 *ата* предполагается равной температуре воды на выходе из данного деаэратора.

для подогревателя № 5	20.10 ³	ккал/ч
» деаэратора 6 ата	30.10 ³	»
» подогревателя № 4	17.10 ³	»
» » № 3	15.10 ³	»
» » № 2	10.10 ³	»
» » № 1	7.10 ³	»

Приведенные величины меньше 0,5% от расхода тепла на подогреватели и деаэраторы при полной нагрузке.

Расход пара из камеры отбора определяют с учетом побочных потоков, например за вычетом отсоса пара из передних уплотнений вала турбины в линию отбора.

Отсос пара с воздухом из одного подогревателя в другой при наличии ограничительных шайб не имеет существенного значения.

В том случае, когда перед подогревателем (например № 1) пар влажный, величину $i^1 - i_{др}^1$ в знаменателе приближенно принимают равной теплоте парообразования $r = 530$ ккал/кг [Л. 24] или по имеющимся проектным данным.

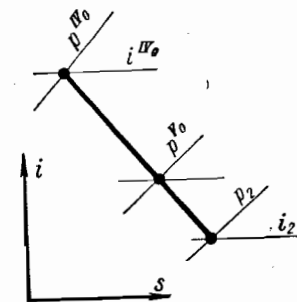


Рис. 5-3. Приблизительное определение состояния влажного пара в отборе.

В дальнейшем, когда будет найдено теплосодержание пара в конце процесса — в выхлопном патрубке, значение i^1 или равное ему i^{v_0} в отборе на подогреватель № 1 уточняют по диаграмме $i-s$, где участок процесса между выхлопом i_2, p_2 и последним отбором перегретого пара, например $p_{iv_0}^1, i_{iv_0}^1$, спрямляют (рис. 5-3).

Если новое значение $i^1 - i_{др}^1$ отличается от 530 больше чем на 5%, что мало вероятно, расчет для определения i_2 повторяют.

В расчете учитывают температуру воды непосредственно на входе в подогреватель и после обводного клапана на выходе. При наличии у подогревателя дренажного охладителя с ответвлением потока конденсата (как в схемах ЛМЗ) в расчет принимают температуру дренажа непосредственно на выходе из подогревателя; для дренажа, поступающего из другого подогревателя каскадно, принимают температуру после охладителя — до дросселя водоотводчика.

Если же в линию конденсата между подогревателями нет подводов со стороны, лучше принять температуру конденсата на входе равной его температуре на выходе из предыдущего подогревателя, а температуру дренажа для всех подогревателей — после охладителя, до дросселя водоотводчика.

Расчет выполняют по форме приложения 5-4.

После определения расхода основных потоков пара, конденсата и питательной воды следует проверить величину неувязки весового баланса пара и конденсата, и если полученные данные не вызывают сомнений, приступают к определению внутренней мощности проточной части. Предварительная проверка опытных данных помогает выявить имеющиеся ошибки и избежать излишних пересчетов в дальнейшем.

в) Внутренний относительный к. п. д. проточной части

Экономичность или совершенство проточной части турбины можно характеризовать двумя значениями внутреннего относительного к. п. д.

Первое значение входит в выражение абсолютного электрического к. п. д. установки:

$$\eta_{аз} = \eta_t \eta_{др} \eta_{во} \eta_{эм}.$$

В случае соплового парораспределения потери дросселирования включаются во внутренний относительный к. п. д. турбины:

$$\eta_{во} = \eta'_{во} \eta_{др},$$

или

$$\eta_{во} = \frac{h_{иср}}{h_{оср}} = \frac{860N}{\sum Dh_0},$$

где $\sum Dh_0$ — сумма располагаемых мощностей (в тепловом выражении) отдельных потоков пара по адиабатам от состояния перед стопорным клапаном до места их выхода из проточной части.

Величины, входящие в последние выражения, нуждаются в пояснениях.

1. Суммарный расход всех потоков пара равен расходу свежего пара:

$$\sum D = D_1.$$

2. Теплопадения h_0 для каждого потока пара не учитывают возврата тепла в ступенях, который больше зависит от качества проточной части — ее к. п. д. и числа ступеней, чем от параметров теплового процесса; кроме того, учесть его в полной мере невозможно, так как измерения параметров пара обычно производятся не во всех ступенях, а между группами ступеней, в камерах отборов.

3. Располагаемое теплопадение для потоков пара через передние уплотнения и на задние уплотнения вала (в том числе через вестовые трубы) принимают по основной адиабате от состояния свежего пара до давления на выходе их из установки или условно до выхлопа; пар, отсасываемый в камеры отборов, либо вытесняет часть этих отборов, либо, что практически одно и то же, через последующую проточную часть идет на выхлоп, вырабатывая часть мощности. Таким образом, потери на концевые уплотнения вала, как и потери на его внутренние уплотнения, учитываются внутренним относительным к. п. д. турбины.

4. Расход пара на эжектор обычно исключают из расхода пара на установку при определении ее к. п. д. (он может быть учтен специальным к. п. д. собственных нужд в приведенном выражении для η_{a3}); этот пар, однако, участвует в регенеративном подогреве конденсата, вытесняя часть последнего отбора с недоиспользованным теплопадением, например $h_{n2}^{V_0}$; учитывая коэффициентом 1,2 его более высокое теплосодержание, чем вытесняемого им пара, можно условно считать, что он поступает непосредственно в камеру отбора, вырабатывая до выхлопа мощность, равную

$$N^3 = 1,2 \frac{D^3 h_{n2}^{V_0}}{860}.$$

Отнимая от расхода свежего пара D_1 расход D^3 на эжектор, следует из внутренней мощности установки вычесть мощность N^3 , а расход пара из последнего отбора соответственно увеличить на $1,2 D^3$.

5. В механические потери входят лишь потери механической энергии, отнимаемые от вала турбины, и потери с наружным охлаждением, создающие фиктивное увеличение использованного теплопадения.

Второе значение внутреннего относительного к. п. д. проточной части, называемого «диаграммным» (η_{bo2}), определяют для «сквозного» потока пара по основной адиабате — от состояния свежего пара до давления выхлопа. Оно удобнее для сравнительной оценки к. п. д. всей проточной части, его определение проще, и практически оно не зависит от величины регенеративных отборов, а также от потерь на концевые уплотнения.

В приведенных ниже формулах и примерах внутренний относительный к. п. д. турбины и ее частей: ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. характеризуется величиной

$$\eta_{bo2} = \frac{h_{n2}}{h_{02}},$$

где h_{n2} и h_{02} — использованное и располагаемое теплопадения в данной проточной части для «сквозного» потока пара.

Следует указать на возможность определения внутреннего относительного к. п. д. отдельных групп ступеней, исключая регулируемую, за которой температурное поле весьма неравномерно, вследствие чего в камере ступени требуется измерение во многих точках. Более надежные данные для регулирующей ступени можно получить из опытов при полном открытии парораспределения.

Для предвключенной турбины определяют относительный электрический к. п. д. — основной показатель ее экономичности:

$$\eta_{o3} = \frac{860 N_3}{\sum D h_0} = \eta_{bo} \eta_{эм}.$$

г) Внутренняя мощность проточной части

Внутреннюю мощность проточной части всей турбины и ее частей (ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.) определяют как сумму мощностей отдельных потоков пара в отбор и на выхлоп по формуле

$$N = \frac{\sum D h_n}{860}.$$

При этом принимают во внимание мощность всех рабочих потоков пара, включая, например, поток пара, отсасываемого через передние уплотнения из камеры регулирующей

щей ступени, по его теплосодержанию, учитывая также его работу в других ступенях, когда он не поступает в подогреватель (при отключенных отборах пара).

В турбинах без регулируемых отборов пара и с влажным паром на выходе мощность N_2 «сквозного» потока

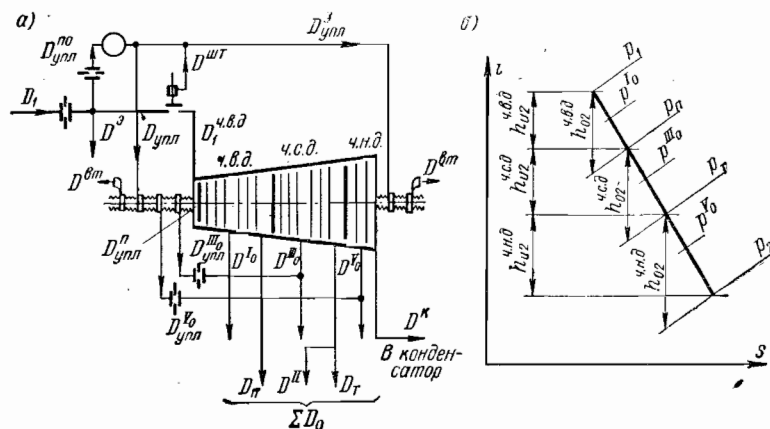


Рис. 5-4. Схема потоков пара (а), $i-s$ диаграмма (б) для турбины типа БПТ-25.

пара D_2 определяют из уравнения баланса внутренней мощности всей турбины:

$$N_2 = N_3 + \Delta N_{эм} - \left(\frac{\sum D h_{и}}{860} \right)^{отбор},$$

после чего находят использованное теплопадение $h_{и2}$, конечное теплосодержание i_2 и внутренний относительный к. п. д. $\eta_{во2}$ для «сквозного» потока пара:

$$h_{и2} = \frac{860 N_2}{D_2}; \quad i_2 = i_1 - h_{и2}; \quad \eta_{во2} = \frac{h_{и1}}{h_{и2}}.$$

Величину $\Delta N_{эм}$ определяют, как показано ниже в пп. «д» и «е».

Расчет выполняют по форме приложения 5-5 — единой для всех проточных частей.

В расчете используют известные опытные величины давлений, температур и расходов пара на входе в проточную часть и регенеративных отборов пара.

Внутреннюю мощность ч. н. д. с влажным паром на выходе для турбины с регулируемым отбором пара определяют из уравнения баланса мощности установки:

$$N^{ч. н. д.} = N - \sum N',$$

$$N = N_3 + \Delta N_{эм};$$

где

$\sum N'$ — суммарная мощность всех других проточных частей (ч. в. д., ч. с. д.):

$$\sum N' = N^{ч. в. д.} + N^{ч. с. д.}$$

После этого находят следующие величины:

$$N_2^{ч. н. д.} = N^{ч. н. д.} - \left(\frac{\sum D h_{и}^{отбор}}{860} \right)^{ч. н. д.};$$

$$h_{и2}^{ч. н. д.} = \frac{860 N_2^{ч. н. д.}}{D_2^{ч. н. д.}};$$

$$i_2 = i_1^{ч. н. д.} - h_{и2}^{ч. н. д.};$$

$$\eta_{во2}^{ч. н. д.} = \frac{h_{и1}^{ч. н. д.}}{h_{и2}^{ч. н. д.}}.$$

Величину использованного теплопадения $h_{и}^{отбор}$ для влажного пара отбора определяют сначала приблизительно, условно спрямляя на $i-s$ диаграмме весь процесс расширения пара от последней камеры отбора перегретого пара до ориентировочного значения теплосодержания пара i_2 на выходе при $p_{2оп}$ (550—570 ккал/кг при $p_2 = 0,03 \div 0,05$ атм). Затем, определяя $h_{и}^{отбор}$ тем же путем при найденном значении i_2 , производят пересчет, после которого новое значение i_2 обычно совсем близко к предыдущему.

Если в турбине с регулируемым отбором пар на входе в ч. н. д. влажный, то мощность ч. с. д. и ч. н. д. определяют из баланса мощности установки по данным специальных опытов (см. стр. 169). После этого вычисляют внутренний относительный к. п. д. проточной части, как показано выше.

Точность определения к. п. д. $\eta_{во}^{ч. н. д.}$ сравнительно невелика, ибо на нем отражаются все ошибки определения величин $N^{ч. в. д.}$ и $N^{ч. с. д.}$ как на остатке баланса мощности всей установки.

Вообще, всякий раз для определения теплосодержания влажного пара приходится прибегать к особой методике ведения опытов и подсчетов для уменьшения ошибки результата.

При испытании турбины с противодавлением, когда пар на выходе перегретый, проверяют величину невязки баланса мощности, характеризующую погрешность главного результата испытания:

$$860 (N_э + \Delta N_{эм}) = \sum D h_{и}.$$

Невязка не должна быть больше 2% номинальной мощности. В идеальном случае

$$\Delta N_{эм} = \frac{\sum D h_{и}}{860} - N_э.$$

Величины располагаемого теплопотока h_0 определяют по $i-s$ диаграмме ВТИ большого масштаба — 1 см соответствует 2 ккал/кг [Л. 12].

Расход пара на входе и на выходе из ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. определяют из уравнений весового баланса потоков пара в зависимости от тепловой схемы в данном опыте. Например, для турбины типа ВПТ-25 по рис. 5-4:

$$D_1^{ч. в. д.} = D_1 - D^э - D_{упл}^{по} - D^{шт};$$

$$D_2^{ч. в. д.} = D_1^{ч. в. д.} - D_{упл}^{п} - D^{I_0};$$

$$D_1^{ч. с. д.} = D_2^{ч. в. д.} - D_{п}; \quad D_2^{ч. с. д.} = D_1^{ч. с. д.} - D^{III_0};$$

$$D_1^{ч. н. д.} = D_2^{ч. с. д.} - D_{т} - D^{II};$$

$$D_2^{ч. н. д.} = D_1^{ч. н. д.} - D^{V_0};$$

$$D^K = D_2^{ч. н. д.} + D_{упл}^э - D^{BT};$$

$$D_{упл} = D_{упл}^{по} + D^{шт} - D_{упл}^э,$$

где $D^э$ — измеряется по соплам эжектора (см. стр. 154);
 $D_{упл}^{по}$ — измеряется или принимается по проекту ($\sim 0,2 \text{ м/ч}$);

$D^{шт}$ — измеряется или принимается по проекту ($\sim 0,4 \text{ м/ч}$);

$D^э$ — измеряется или принимается по проекту ($\sim 0,3 \text{ м/ч}$);

D^{BT} — измеряется или принимается по проекту ($0,03-0,05 \text{ м/ч}$);

$$D_{упл}^{п} = D_{упл}^{III_0} + D_{упл}^{V_0} + D^{BT} - D_{упл};$$

$D_{упл}^{III_0}$ и $D_{упл}^{V_0}$ измеряются ($\sim 0,015 D_1^{ч. в. д.}$ и $\sim 0,05 D_1^{ч. в. д.}$).

Численные значения в скобках относятся к турбине типа ВПТ-25.

д) Потери в генераторе

Потери механической и электрической энергии в генераторе определяют путем его испытания или же по проектным, каталожным данным.

Потери состоят из двух частей — постоянной (вентиляционные, в подшипниках и др.) и переменной, пропорциональной квадрату тока или активной нагрузке генератора и зависящей также от напряжения.

Ориентировочная величина потерь в генераторе в зависимости от его номинальной мощности и способа охлаждения приведена в табл. 5-3.

При $\cos \varphi$, отличающемся от номинального (и при номинальном напряжении), отношение $\left(\frac{N_э}{N_{эн}}\right)^2 = (\delta N)^2$ заменяется отношением соответствующих токов $\left(\frac{I}{I_n}\right)^2$.

Имея формулу потерь в генераторе, их величину при условиях опытов, а также при условиях характеристики определяют по форме приложения 5-3. Там же указывают механические потери в турбине и электромеханический к. п. д. установки.

е) Механические потери в турбине

Механические потери энергии в турбине принимают по проектным данным, а точнее — определяют опытным путем как разность внутренней мощности турбины и потерь

Серия	Тип генератора	Номинальный $\cos \varphi_n$	Мощность при $\cos \varphi_n$, кет	К. п. д. при нагрузке в долях номинальной			Потери в генераторе при мощности ΔN в долях номинальной, кет *
				1	3/4	0,5	
Старая серия с воздушным охлаждением при $n = 3000$ об/мин	T-285/50	0,8	1 000	92,8	91,4	90,0	43 + 29 $(\Delta N)^2$
	T-2140/80	0,8	6 000	94,9	94,0	92,9	180 + 120 $(\Delta N)^2$
	T-2210/87	0,8	12 000	95,7	94,7	93,8	325 + 190 $(\Delta N)^2$
	T-2270/98	0,8	24 000	96,0	95,3	94,2	600 + 360 $(\Delta N)^2$
	T-4376/142	0,9	50 000	97,5	97,2	96,5	750 + 500 $(\Delta N)^2$
Новая серия с воздушным охлаждением при $n = 3000$ об/мин	T2-1-2	0,8	1 000	93,6	92,5	91,0	40 + 25 $(\Delta N)^2$
	T2-6-2	0,8	6 000	96,0	95,5	94,0	160 + 80 $(\Delta N)^2$
	T2-12-2	0,8	12 000	96,5	96,3	94,8	275 + 145 $(\Delta N)^2$
	T2-25-2	0,8	25 000	97,2	96,7	95,4	525 + 175 $(\Delta N)^2$
	T2-50-2	0,85	50 000	97,6	97,0	96,0	950 + 250 $(\Delta N)^2$
Серия с водородным охлаждением при $n = 3000$ об/мин	T2-100-2	0,9	10 000	97,8	97,5	96,8	1400 + 800 $(\Delta N)^2$
	TГВ-25	0,8	30 000	98,3	—	—	240 + 270 $(\Delta N)^2$
	TГВ-50	0,8	50 000	98,5	—	—	400 + 350 $(\Delta N)^2$
	TГВ-100	0,85	100 000	98,7	—	—	800 + 500 $(\Delta N)^2$

* Составлено по приведенным для генераторов завода «Электросила» значениям к. п. д., взятым из [Л. 25, т. I]

в генераторе при опыте холостого хода с возбужденным генератором:

$$\Delta N_m = \frac{(\sum D h_n)_{xx}}{860} - \Delta N_{г\text{ }xx}.$$

Величина $(\sum D h_n)_{xx}$ включает в себя механическую работу всех потоков пара: «сквозного» до выхлопа, через передние уплотнения из камеры регулирующей ступени в камеры отборов, и затем до выхлопа, отбор на ПНД № 1 (при невозможности его отключить по пару или по воде) и др.

Опыт холостого хода проводят при установившихся параметрах пара — свежего и на выхлопе, где его состояние должно быть перегретым, что обычно достигается.

Расход пара (конденсата) измеряют баком. Для испытания требуется тщательная проверка тепловой схемы, ее изоляция от посторонних потоков пара и воды, надежная водяная плотность конденсатора.

Для всех нагрузок установки механические потери в киловаттах считают постоянными и учитывают по форме приложения 5-3.

Ориентировочная величина механических потерь в турбине в процентах от ее номинальной мощности составляет:

Номинальная мощность, Мвт	Механические потери, %
50 и более	1—0,5
25	1
5	3
1	4
0,1	8

5-3. ПРИВЕДЕНИЕ ОПЫТНЫХ ВЕЛИЧИН К УСЛОВИЯМ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Учитывая отклонение условий работы установки во время опытов от тех параметров, тепловой схемы и прочих условий, для которых должны быть составлены тепловые характеристики установки (см. § 3-3), значения $D_{1\text{ }оп}$

и $N_{э,оп}$ для каждого режима приводят расчетным путем к условиям характеристики.*

Режим нагрузки, или открытие органов парораспределения, полагают неизменным, т. е. таким же, как во время опыта. Это с наименьшей погрешностью позволяет применить для условий характеристики опытные значения внутреннего относительного к. п. д. проточной части турбины, что особенно важно при сопловом парораспределении.

Расчет производят по единой для всех установок форме — см. приложения 5-6 и 5-7.

Для установок с регулируемыми отборами пара каждую часть: ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. рассчитывают самостоятельно, как отдельную турбину, а затем, на основе их характеристик $N_{x'} = f(D_{1x'})$, называемых ниже исходными, производят расчет и построение диаграмм режимов по расходу пара и тепла для всей установки по форме приложения 5-8.

Величины, относящиеся к исходным характеристикам, имеют внизу индекс «х'», в отличие от индекса «х» для величин, относящихся к условиям тепловой характеристики всей установки. Например, $D_{1x'}$ ч. с. д. — расход пара на входе в ч. с. д. при условиях исходной характеристики ч. с. д.

В дополнение к имеющимся в приложениях 5-6, 5-7 и 5-8 указаниям по методике расчета необходимы следующие пояснения.

1. Выбор условий для исходных характеристик ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. турбины с регулируемыми отборами пара

1. Начальные параметры пара для ч. в. д. принимают те же, что и для свежего пара по условиям характеристики установки. Давление в камере отбора перед ч. с. д.

* Употребление обычного термина «номинальные условия» вместо примененного в книге термина «условия характеристики», ввиду частого их несовпадения по содержанию полагаем нецелесообразным. В качестве обычных расхождений можно назвать температуру питательной воды, принимаемой по результатам испытаний, постоянное давление в конденсаторе, более или менее существенные отклонения в тепловой схеме, расход пара на эжектор, исключаемый из номинальных заводских условий.

и ч. н. д. принимают также по условиям характеристики установки. Оно может быть меньше максимального, допустимого по проектным данным. Следовательно, с момента полного открытия органов парораспределения этих частей дальнейшее увеличение расхода пара через них происходит при «естественном» повышении давления в камере теперь уже нерегулируемого отбора.

Исходные характеристики ч. с. д. и ч. н. д. включают и зону расхода пара при «естественном» повышении начального давления до максимально допустимого.

При определении мощности ч. н. д. учитывают не только «естественное» повышение давления на входе, но и связанное с ним повышение тепло содержания (температуры) пара вследствие уменьшения теплопадения в ч. с. д. (см. приложение 5-6, примечания, стр. 312). Это позволяет сократить

в дальнейшем число поправок к диаграмме режимов на отклонение ее условий от условий реального теплового процесса при различных режимах нагрузки турбины.

С момента повышения начального давления пара теплопадение в проточной части возрастает, особенно при сопловом парораспределении, что вызывает излом характеристики $N_{x'} = f(D_{1x'})$ в сторону увеличения $N_{x'}$ (рис. 5-5).

При дроссельном парораспределении излом характеристики менее заметен, поскольку с увеличением расхода пара до указанного момента также происходит повышение давления всего потока пара на входе в проточную часть и увеличение его теплопадения.

2. Температуру пара в камерах отбора перед ч. с. д. и ч. н. д., зависящую от расхода свежего пара и давления в камере, принимают приблизительно равной среднему опытному значению. В дальнейшем вводят поправку

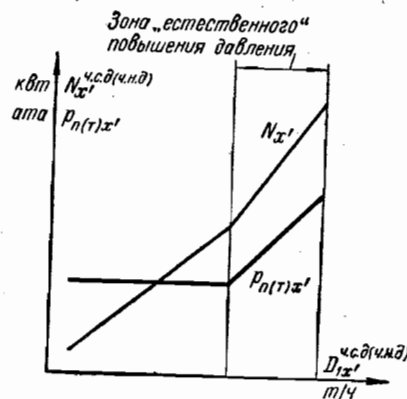


Рис. 5-5. Излом исходной характеристики $N = f(D_1)$ ч. с. д. и ч. н. д. при «естественном» повышении давления на входе и сопловом парораспределении.

на отклонение действительной температуры от принятой для исходной характеристики.

3. Конечное давление пара для ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. принимают постоянным — по условиям характеристики установки; поправку к мощности ч. в. д. и ч. с. д. на «естественное» повышение давления на выходе вводят в дальнейшем.

4. Отсос пара из уплотнений переднего конца вала турбины в линии отборов из ч. с. д. и ч. н. д. определяют, исходя из следующих предпосылок:

а) расход пара $D_{\text{упл}}^{\text{п}}$ через передние уплотнения зависит от давления в камере первой (регулирующей) ступени или от расхода свежего пара:

$$D_{\text{упл}}^{\text{п}} = f(D_1);$$

б) отсос пара из второй камеры уплотнений в пятый отбор зависит в основном от давления в первой камере уплотнений, т. е. в камере третьего отбора или от расхода пара на выходе из ч. с. д.:

$$D_{\text{упл}}^{\text{во}} = f(D_2^{\text{ч. с. д.}}),$$

а для установки с одним регулируемым отбором — от расхода свежего пара:

$$D_{\text{упл}}^{\text{во}} = f(D_1);$$

в) расход пара из первой камеры уплотнений в третий отбор определяется из уравнения весового баланса:

$$D_{\text{упл}}^{\text{IIIo}} = D_{\text{упл}}^{\text{п}} - D_{\text{упл}}^{\text{во}} + D_{\text{упл}} - D_{\text{вт.}}$$

На основании опытных данных строят графики зависимостей

$$D_{\text{упл}}^{\text{п}} = f(D_1), \quad D_{\text{упл}}^{\text{во}} = f(D_2^{\text{ч. с. д.}})$$

или

$$D_{\text{упл}}^{\text{во}} = f(D_1)$$

для установки с одним регулируемым отбором пара.

Пользуясь полученными графиками, в расчетах для построения исходных характеристик ч. с. д. и ч. н. д.

учитывают поступление пара из уплотнений в отборы ($D_{\text{упл}}^{\text{п}}$, $D_{\text{упл}}^{\text{IIIo}}$, $D_{\text{упл}}^{\text{во}}$), исходя из следующих условий:

для ч. с. д. — расход свежего пара равен расходу пара на выходе из ч. с. д.;

для ч. н. д. — расход пара на выходе из ч. с. д. равен расходу пара на входе в ч. н. д. (фиктивному — см. стр. 273), а в установке с одним регулируемым отбором пара расход свежего пара равен расходу пара на входе в ч. н. д.

В дальнейшем при расчете диаграммы режимов вводят поправку к характеристике ч. с. д. на действительное значение $D_{\text{упл}}^{\text{IIIo}}$ для заданного расхода свежего пара.

Следует добавить, что при указанных условиях в расчете диаграммы режимов для установки с двумя регулируемы отборами пара поправка на отсос пара в ч. н. д. — в пятый отбор равна нулю, поскольку здесь $D_{\text{т}} = 0$ и $D_2^{\text{ч. с. д.}} = D_{\text{ф}}^{\text{ч. н. д.}}$ для всех режимов.

Следовательно, поправка к расходу пара из уплотнений в третий отбор, т. е. в ч. с. д., численно равна поправке к общему расходу пара через передние уплотнения, зависящей от заданного расхода свежего пара и расхода на выходе из ч. с. д.:

$$\Delta D_{\text{упл}}^{\text{IIIo}} = \Delta D_{\text{упл}}^{\text{п}},$$

см. приложения 5-4, п. 20 и приложение 5-8, п. 10.

2. Определение приведенного расхода пара — свежего и на входе в проточную часть

Приведенный расход пара на входе в проточную часть (ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.) определяют в зависимости от отношения конечного давления к начальному p_2/p_1 по формуле

$$D_{1x} = D_{1\text{оп}} \sqrt{\frac{p_{1x}^2 - p_{2x}^2}{p_{1\text{оп}}^2 - p_{2\text{оп}}^2}} \sqrt{\frac{T_{1\text{оп}}}{T_{1x}}},$$

или

$$D_{1x} = D_{1\text{оп}} \frac{p_{1x}}{p_{1\text{оп}}} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_{2x}}{p_{1x}}\right)^2}{1 - \left(\frac{p_{2\text{оп}}}{p_{1\text{оп}}}\right)^2}} \sqrt{\frac{T_{1\text{оп}}}{T_{1x}}},$$

либо по упрощенной формуле

$$D_{1x} = D_{1\text{оп}} \frac{p_{1x}}{p_{1\text{оп}}} \sqrt{\frac{T_{1\text{оп}}}{T_{1x}}}$$

Представление о возможной погрешности упрощенного расчета дает следующий пример.

Пример. При допустимых во время опытов отклонениях $p_{1\text{оп}}$ от p_{1x} и $p_{2\text{оп}}$ от p_{2x} , равных $\pm 5\%$, отклонение $p_{2\text{оп}}/p_{1\text{оп}}$ от p_{2x}/p_{1x} не превышает $\pm 10\%$. В табл. 5-4 приведено значение множителя

$$\sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_{2x}}{p_{1x}}\right)^2}{1 - \left(\frac{p_{2\text{оп}}}{p_{1\text{оп}}}\right)^2}}$$
 и погрешность от его упразднения при $\frac{p_{2\text{оп}}}{p_{1\text{оп}}} = 1,1 \frac{p_{2x}}{p_{1x}}$ для значений $\frac{p_{2x}}{p_{1x}}$ от 0,1 до 0,5.

Таблица 5-4

$\frac{p_{2x}}{p_{1x}}$	$\frac{p_{2\text{оп}}}{p_{1\text{оп}}}$	$\sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_{2x}}{p_{1x}}\right)^2}{1 - \left(\frac{p_{2\text{оп}}}{p_{1\text{оп}}}\right)^2}}$	Относительная погрешность расхода пара δD_1 , %
0,1	0,11	1,0010	-0,1
0,2	0,22	1,0044	-0,4
0,3	0,33	1,011	-1,1
0,4	0,44	1,021	-2,1
0,5	0,55	1,038	-3,8

Погрешность δD_1 расхода пара на входе в проточную часть сопровождается приблизительно равной по величине и знаку относительной погрешностью в расчете приведенной внутренней мощности проточной части δN — по приложению 5-6. При этом не учитывается то обстоятельство, что изменение расхода свежего пара при заданных его параметрах сопряжено с изменением открытия парораспределения, а следовательно, и с изменением к. п. д. проточной части.

Можно считать, что в действительности изменение мощности происходит по закону спрямленной характеристики, по крайней мере в практической зоне нагрузки — от 0,4 до 1,0 номинального значения (см. стр. 65).

Величине погрешности δD_1 расхода свежего пара отвечает по искомой спрямленной характеристике $D_1 = aN_y$

равное по величине и знаку относительное изменение условной мощности δN_y .

Таким образом, для нового расхода пара, равного $D_1(1 + \delta D_1)$, расчетная приведенная мощность будет отличаться от действительной по спрямленной характеристике на величину абсолютной погрешности:

$$\Delta N = \delta N \cdot N - \delta N_y \cdot N_y$$

Величина ΔN в долях от мощности N_y на зажимах генератора составит:

$$\delta N_y = \frac{\Delta N}{N_y} = \frac{\delta N \cdot N}{N \eta_{эм}} - \frac{\delta N_y}{N_y} (N_y + x N_y^H),$$

где (см. стр. 65)

$$N_y + x N_y^H = N_y$$

Поскольку

$$\delta N = \delta D_1 \text{ и } \delta N_y = \delta D_1,$$

получаем:

$$\delta N_y = \frac{\delta D_1}{\eta_{эм}} - \delta D_1 \left(1 + \frac{x N_y^H}{N_y}\right),$$

или

$$\delta N_y = -\delta D_1 \left(1 + \frac{x N_y^H}{N_y} - \frac{1}{\eta_{эм}}\right).$$

Следовательно, погрешность приведенной мощности зависит от ее величины в долях номинальной и от расхода на холостой ход x , причем для турбины с конденсатором ($x \approx 0,05$) она незначительна. Так, например, при $N_y = 0,4 N_y^H$, $x = 0,05$ и $\eta_{эм} = 0,95$ получаем:

$$\delta N_y = -\delta D_1 \left(1 + \frac{0,05}{0,4} - \frac{1}{0,95}\right) = 0,07 \delta D_1.$$

Для значения максимального пропуск пара $D_{1\text{макс}}$ через проточную часть при условиях характеристики полностью сохраняются погрешности δD_1 по табл. 5-4.

Учитывая малость величины $\Delta t_1 = t_{1\text{оп}} - t_{1x}$, обычно принимаем:

$$\sqrt{\frac{T_{1\text{оп}}}{T_{1x}}} = \sqrt{1 + \frac{T_{1\text{оп}} - T_{1x}}{T_{1x}}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta t_1}{T_{1x}}} \approx 1 + \frac{\Delta t_1}{2T_{1x}},$$

поскольку

$$\left(1 + \frac{\Delta t_1}{2T_{1x}}\right)^2 = 1 + \frac{\Delta t_1}{T_{1x}} + \left(\frac{\Delta t_1}{2T_{1x}}\right)^2,$$

и можно считать

$$\left(\frac{\Delta t_1}{2T_{1x}}\right)^2 \approx 0.$$

Приведенный расход свежего пара на установку определяют как сумму расхода пара на входе в ч. в. д. и расхода пара на эжектор и уплотнения, в зависимости от тепловой схемы (см. рис. 5-4).

3. Определение приведенной внутренней мощности проточной части

Приведенную внутреннюю мощность проточной части определяют из выражения

$$N_x = \frac{\sum D_x h_{ix}}{860},$$

где D_x и h_{ix} — расход и использованное теплопадение всех потоков пара из отборов и на выходе при условиях характеристики.

Приведенные расходы пара из нерегулируемых отборов определяют путем полного расчета тепловой схемы при условиях характеристики, как это первоначально было выполнено для условий опытов. Такой метод точнее, нагляднее и едва ли сложнее, чем определение приведенных расходов путем поправок к их опытным значениям.

Использованные же теплопадения находят путем введения поправок к опытным значениям, причем для отбираемого пара вводится поправка на отклонение начальных параметров пара, а для «сквозного» потока, кроме того, еще поправка на отклонение конечного давления.

Для турбины без отборов пара:

$$N_x = \frac{D_{1x} h_{12x}}{860},$$

или

$$N_x = \beta_{D_1} \beta_{h_1} \frac{D_{1\text{оп}} h_{12\text{оп}}}{860} = \beta_{D_1} \beta_{h_1} N_{\text{оп}},$$

где β_{D_1} и β_{h_1} — поправочные множители к мощности, равные отношению расхода свежего пара и его использованного теплопадения при условиях характеристики к их опытным значениям.

а) Расход пара из камер отборов на регенерацию и на выходе из проточной части

Расход пара из камер отборов на подогреватели и деаэраторы определяют из уравнений теплового баланса (см. § 5-2) по форме приложения 5-4 с учетом тепловой схемы по условиям характеристики. При этом в качестве условий характеристики принимают перечисленные ниже данные для расчета.

1. Теплосодержание конденсата на входе в подогреватель i_{k1x} и на выходе из него i_{k2x} находят по графикам температуры конденсата после подогревателей (до обвода) $t_{k2\text{оп}} = f(D_{1\text{оп}})$ для значения $D_{1\text{оп}} = D_{1x}$ в данном опыте.

Для турбины с регулируемым отбором пара $D_{1\text{оп}}$ и D_{1x} означают расход пара на входе в ту часть турбины ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д., из которой пар поступает в подогреватель.

Если опытные величины i_{k2} почему-либо непригодны, то в качестве условий характеристики используют проектные значения либо опытную (проектную) величину температурного напора δt и давление перед подогревателем при условиях характеристики, принимая $t_{k2x} = t'_x - \delta t_x$ (см. стр. 45).

Для первого по ходу конденсата подогревателя после парового эжектора считают:

$$i_{k1x}^I = t'_{2x} + \frac{D^3 \cdot 550}{G_{кx}^3},$$

где i'_{2x} — температура насыщения по давлению p_{2x} в конденсаторе при условиях характеристики, близкая к теплосодержанию конденсата, ккал/кг;

D_x^3 — расход пара на эжектор, т/ч;

$G_{кx}^3$ — расход конденсата через подогреватель (охладитель) эжектора, т/ч.

Если из расхода свежего пара на установку желательно исключить расход пара на эжектор, следует принять $i_{k1x}^I = i'_{2x}$. Об учете охладителя дренажа см. стр. 238.

2. Теплоиспользование пара в подогревателях принимают по опытным данным:

$$(i - i_{др})_x = (i - i_{др})_{\text{оп}},$$

где i и $i_{др}$ — теплосодержание пара на входе в подогреватель и дренажа на выходе, ккал/кг. Ошибка от такой замены незначительна.

3. Расход конденсата через подогреватели низкого давления $G_{кх}$ вначале принимают ориентировочно. Затем, исходя из расхода пара на входе в проточную часть, питающую паром данный подогреватель, и учитывая расход пара в отборы, в конденсатор, а также схему удаления дренажа, уточняют расход конденсата путем увязки весового баланса пара и конденсата, что достигается в результате одного-двух пересчетов.

Для турбины с двумя регулируемыми отборами пара, например типа ВПТ-25, расход конденсата через подогреватель № 3 определяют из выражения (см. рис. 5-2 и 5-4):

$$G_{к}^{III} = D_{1х}^{ч.с.д.} + D_{упл}^{II} + D^3 + D^{3у} + D_{упл} - 2D^{вт.}$$

Расход конденсата через подогреватели № 1 и 2 (а также отборы пара из ч. с. д. и ч. н. д.) определяют, исходя из приведенного расхода пара на входе в ч. с. д. ($D_{1х}^{ч.с.д.}$) и соответствующего расхода пара в ч. н. д. при условии $D_T = 0$, принятом в расчете и построении диаграммы режимов (см. § 5-5).

Таким образом,

$$G_{к}^{II} = G_{к}^{III},$$

$$G_{к}^I \approx G_{к}^{II} - D^{III} - D^{II} - D^I,$$

где расход пара на подогреватель № 1 (дренажа из него) D^I можно принять равным опытному значению для соответствующего расхода пара в ч. н. д., без последующего уточнения величины $G_{к}^I$.

На основании полученных данных строят графики зависимости приведенных отборов пара на подогреватели № 1 и 2: $D^{Vo} = f(D_1^{ч.с.д.})$ и $D^{II} = f(D_{1ф}^{ч.с.д.})$, которые используют затем в расчетах характеристики ч. н. д. (см. приложение 5-6).

Такой метод расчета позволяет учесть влияние отсосов пара из передних уплотнений и выпара дренажей в подогревателях (№ 1 и 2) в зависимости от расхода пара в ч. с. д.

Получаемая же характеристика ч. н. д. связана с ч. с. д. условием $D_T = 0$.

4. Расход питательной воды считают равным расходу свежего пара (при отсутствии испарителей) — по условиям характеристики.

В отношении первого после питательного насоса подогревателя обращают внимание на повышение тепло- содержания питательной воды в насосе, различное при разных расходах воды. Условно температуру воды до и после насоса считают одинаковой, а увеличение ее тепло- содержания ($\Delta i_{пн} = 1 \div 3$ ккал/кг), связанное с повыше- нием давления, относят за счет насоса и учитывают при вычислении расхода тепла на установку (см. приложение 5-8, п. 27).

Расход пара на выходе («сквозной» поток) D_2 опреде- ляют из уравнения весового баланса потоков пара в про- точной части (см. стр. 244).

Расход пара на деаэратор не может быть учтен в тепло- вой характеристике одной из проточных частей, если его расход зависит от величины регулируемых отборов, т. е. от режима нагрузки всей установки. В этом случае расход пара на деаэратор определяют в расчете диаграммы режи- мов (см. приложение 5-8).

б) **Использованное теплопадение $h_{пх}$ потоков отборного пара и «сквозного» потока пара — на выходе из проточной части**

При неизменном открытии парораспределения наи- большие изменения располагаемого теплопадения и внут- реннего относительного к. п. д. проточной части происходят в последней и близких к ней ступенях, вследствие изме- нения расхода и давления пара на выходе.

Изменение же начальной температуры или теплосодер- жания пара вызывает приблизительно одинаковое изме- нение располагаемого теплопадения во всех ступенях или для всех потоков пара, включая «сквозной» поток.

Известно, что теплопадение в последних ступенях, следовательно, и их к. п. д. изменяются незначительно, если давление пара p_2 на выходе изменяется пропорцио- нально его расходу (при этом в ступенях практически сохраняется постоянное отношение p_2/p_1).

Указанная зависимость положена в основу излагае- мой ниже методики приведения внутренней мощности проточной части от одних параметров к другим, например от $p_{1оп}$, $t_{1оп}$, $p_{2оп}$ к $p_{1х}$, $t_{1х}$, $p_{2х}$ при неизменном открытии парораспределения [Л. 29].

На адиабате для новых параметров p_{1x} , t_{1x} и p_{2x} по рис. 5-6 находят точку ее пересечения с изобарой

$$p_{2пр} = p_{2оп} \frac{D_{2x}}{D_{2оп}},$$

где D_{2x} и $D_{2оп}$ — расходы пара «сквозного» потока при соответствующих индексам параметрах.

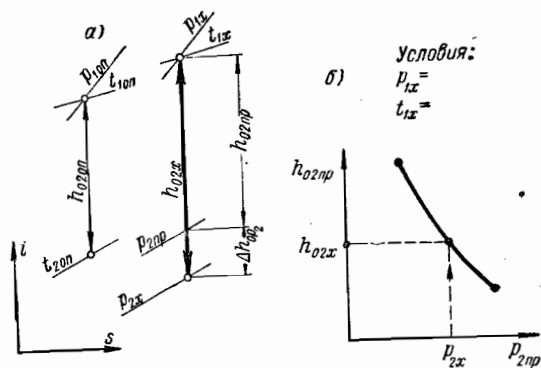


Рис. 5-6. Определение поправки к мощности на изменение располагаемого теплопадения.

Располагаемое теплопадение для «сквозного» пара при новых параметрах процесса можно рассматривать как сумму двух величин:

$$h_{02x} = \Delta h_{0p2} + h_{02пр} = \Delta h_{0p2} + \beta_{h_0} h_{02оп},$$

где Δh_{0p2} — отрезок новой адиабаты между изобарами p_{2x} и $p_{2пр}$, представляющий собой изменение располагаемого теплопадения «сквозного» потока пара в последних ступенях, вследствие отклонения приведенного давления пара на выходе $p_{2пр}$ от значения p_{2x} .

Величина же $\beta_{h_0} = \frac{h_{02пр}}{h_{02оп}}$ выражает относительное изменение располагаемого теплопадения для «сквозного» и приближенно для отборного пара при переходе от параметров $p_{1оп}$, $t_{1оп}$, $p_{2оп}$ к параметрам p_{1x} , t_{1x} , $p_{2пр}$.

Учитывая, что величина β_{h_0} обычно мало отличается от единицы, можно внутренний относительный к. п. д. всех ступеней (исключая влияние Δh_{0p2} на последние ступени) считать неизменным, и тогда при новых пара-

метрах использованное теплопадение для всех потоков пара составит:

$$h_{нх} = h_{ноп} \beta_{h_0},$$

а для «сквозного» потока пара дополнительная поправка равна:

$$\Delta h_{np2} = (0,7 \div 0,8) \Delta h_{0p2}$$

с допущением, что к. п. д. последней ступени не изменяется и в среднем составляет 0,7 для влажного пара и 0,8 для перегретого.

Если же известна опытная, т. е. действительная, поправка $\Delta' N_{p2}$ [квт/ата] к мощности на изменение величины p_2 , учитывающая значительные изменения теплопадения h_0 и к. п. д. $\eta_{в0}$ последних ступеней, то величину Δh_{np2} определяют из выражения

$$\Delta h_{np2} = \frac{860 \Delta' N_{p2}}{D_{2x}} = \frac{860 \Delta' N_{p2} (p_{2x} - p_{2пр})}{D_{2x}},$$

где $\Delta' N_{p2}$ — изменение мощности «сквозного» потока пара со знаком минус для увеличения давления p_2 на 1 ата, квт/ата.

Таким образом, поправка на изменение теплопадения в последних ступенях определяется по достоверной поправке к мощности на изменение конечного давления.

Использованное теплопадение «сквозного» потока равно:

$$h_{н2x} = h_{н2оп} \beta_{h_0} + \Delta h_{np2}.$$

Величину β_{h_0} для потоков отборного пара и $h_{н2x}$ для «сквозного» потока определяют по форме табл. 5-5.

Поскольку для заданных значений начальных параметров p_{1x} и t_{1x} приведенная величина $h_{02пр}$ зависит только от приведенного конечного давления $p_{2пр}$, представляется возможным для всех опытов пользоваться вспомогательным графиком зависимости $h_{02пр} = f(p_{2пр})$ по рис. 5-6, б.

Мощность проточной части при новых параметрах пара находят, как уже указывалось выше, из выражения

$$N_x = \frac{\sum D_x h_{нх}}{860},$$

Таблица 5-5

Обозначение величины	Значение величины		Способ определения
Номер опыта	1	2	
$h_{02 \text{ оп}}$		122	По $i-s$ диаграмме для $p_{1 \text{ оп}}, t_{1 \text{ оп}}, p_{2 \text{ оп}}^*$
$p_2 \text{ пр}$		12,6	$p_{2 \text{ оп}} \frac{D_{2x}}{D_{2 \text{ оп}}}$
$h_{02 \text{ пр}}$		126	По $i-s$ диаграмме для p_{1x}, t_{1x} и $p_{2 \text{ пр}}$ — см. рис. 5-6, а и б
β_{h_0}		1,033	$h_{62 \text{ пр}} : h_{02 \text{ оп}}$
$\Delta h_{0p_2} [\Delta N_{p_2}]$		-1,2	$h_{02x} - h_{02 \text{ пр}}$ или $[\Delta' N_{p_2} (p_{2x} - p_{2 \text{ пр}})]$, см. стр. **
Δh_{ip_2}		-0,9	$(0,7 \div 0,8) \Delta h_{0p_2}$ или $[860 \Delta N_{p_2} : D_{2x}]$
$h_{и2x}$		97,1	$h_{и2 \text{ оп}} \beta_{h_0} + \Delta h_{ip_2}$
$\beta_{h_{и}}$		1,022	$h_{и2x} : h_{и2 \text{ оп}}$

* Для численного примера (опыт № 2) дано:

$$p_{1 \text{ оп}} = 92 \text{ ата}; \quad p_{1x} = 90 \text{ ата};$$

$$t_{1 \text{ оп}} = 490^\circ \text{ С}; \quad t_{1x} = 500^\circ \text{ С}; \quad h_{и2 \text{ оп}} = 95 \text{ ккал/кг.}$$

$$p_{2 \text{ оп}} = 13 \text{ ата}; \quad p_{2x} = 13 \text{ ата};$$

** h_{02x} — по $i-s$ диаграмме для p_{1x}, t_{1x}, p_{2x} ; для данного примера $h_{02x} = 124,8 \text{ ккал/кг.}$

где D_x и $h_{иx}$ — расход пара и использованное теплосодержание потоков пара, включая «сквозной», при параметрах, отвечающих индексам, либо из выражения

$$N_x = \frac{\sum D_x h_{и \text{ оп}}}{860} \beta_{h_0} + \Delta N_{p_2}.$$

Для определения теплосодержания свежего пара, а также располагаемого теплосодержания и его приведенного значения можно пользоваться $i-s$ диаграммой большого масштаба по рис. 5-7.

в) Определение использованного теплосодержания с учетом конечной влажности пара

Когда значительная доля теплосодержания (например в ч. н. д.) находится в зоне влажного пара, то при смещении процесса в $i-s$ диаграмме учитывают уменьшение

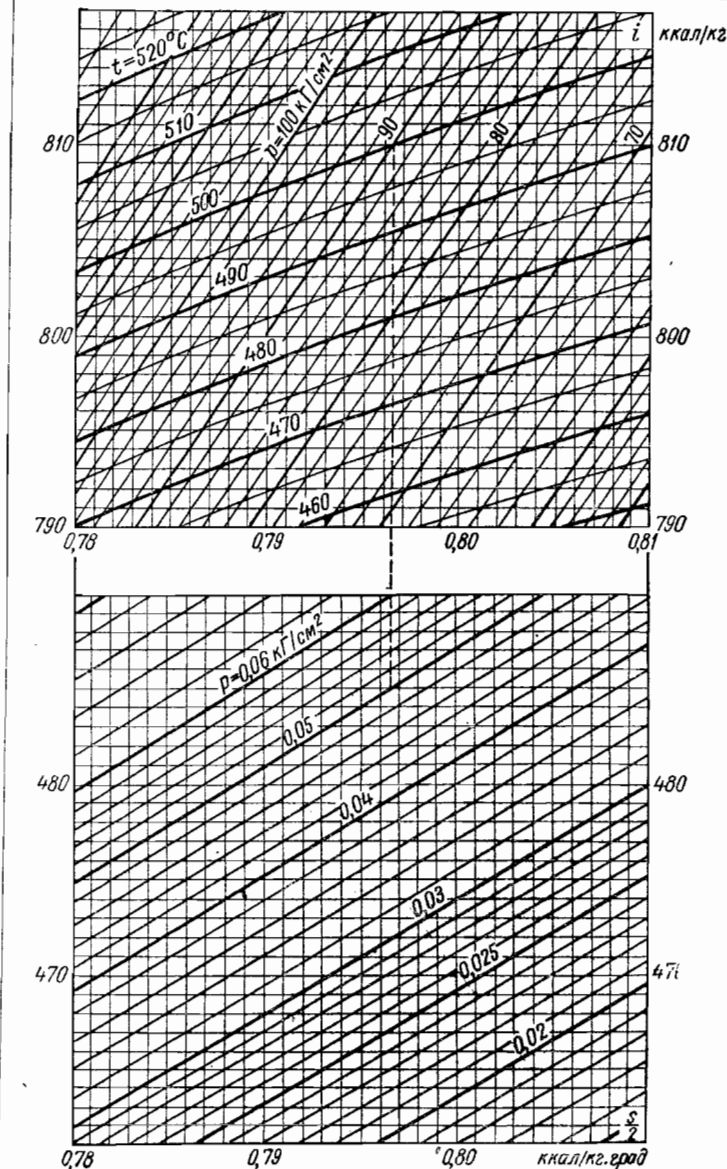


Рис. 5-7. $i-s$ диаграмма для водяного пара со сближенными участками начала и конца процесса.

к. п. д. проточной части в размере около 1% на каждый процент средней влажности пара.

В обычный для перегретого пара пересчет использованного теплопадения «сквозного» пара пропорционально располагаемому по формуле

$$h_{\text{н2х}} = h_{\text{н2оп}} \frac{h_{02\text{х}}}{h_{02\text{оп}}}$$

(при допущении $\eta_{\text{вох}} = \eta_{\text{во оп}}$) вносят поправку на влажность. Поправка заключается в том, что отношение распо-

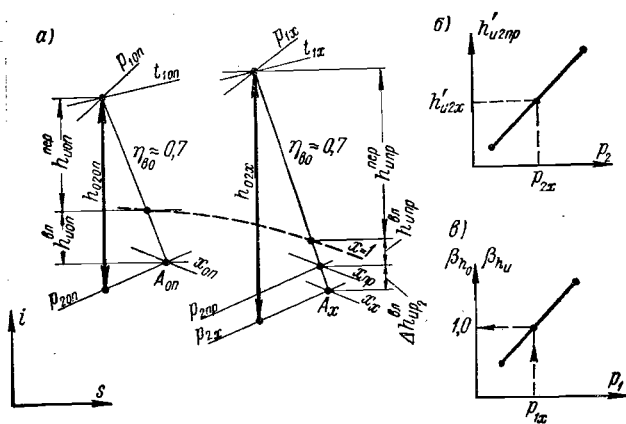


Рис. 5-8. Определение поправки к мощности на изменение располагаемого теплопадения с учетом влияния конечной влажности пара.

лагаемых теплопадения $h_{02x}/h_{02оп}$ заменяют отношением условных использованных теплопадения по $i-s$ диаграмме для всего опытного и приведенного процессов $h'_{и2р}/h'_{и2оп}$. При этом к. п. д. считают одинаковыми ($\eta_{во оп} = \eta_{вох}$), а использованные теплопадения в зоне влажного пара умножают на $\frac{1+x}{2}$ соответственно конечной сухости пара опытного и приведенного условных процессов.

Определение поправки α показано в табл. 5-6 и на рис. 5-8, где рабочие зоны перегретого и влажного пара приблизительно находятся по условным спрямленным линиям процесса на $i-s$ диаграмме при одном среднем к. п. д. проточной части $\eta_{\text{в.о.п.}} = \eta_{\text{в.о.оп.}} \approx 0,7 \div 0,8$ или близком к опытному значению.

Таблица 5-6

Поправка к использованному теплоплатению (к мощности проточной части) при переходе от одних параметров пара $\rho_{10\text{п}}, t_{10\text{п}}, p_{20\text{п}}$ к другим $\rho_{1\text{х}}, t_{1\text{х}}, p_{2\text{х}}$ с учетом конечной влажности пара

№ пп.	Изменяемый параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		p_1, t_1, p_2	p_1	t_1	p_2					Способ определения
1	Значение параметра	$p_{1\text{оп}}, t_{1\text{оп}}, p_{2\text{оп}}$	$p_{1\text{х}} + \Delta p_1$	$t_{1\text{х}} + \Delta t_1$	$p_{2\text{х}} + \Delta p_2$	$p_{2\text{х}}$	$p_{2\text{х}} - \Delta p_2$			
2	$h_{\text{пер}}$ $h_{\text{и оп}}$	8,0			9,0	9,0	9,0			По $i-s$ диаграмме, рис. 5-8, а
3	$x_{\text{оп}}$	0,911			0,928	0,920	0,908			То же
4	$h_{\text{вд}}$ $h_{\text{и оп}}$	82,0			66,0	74,0	85,0			
5	$h_{\text{и2 оп}}$	86,0			72,3	80,0	89,8			$h_{\text{пер}} + h_{\text{и}} \left(\frac{1+x}{2} \right)$
6	$p_{2\text{пр}}$	0,044			0,07	0,05	0,03			$\frac{D_{2\text{х}}}{p_{2\text{оп}} D_{2\text{оп}}} \approx p_{2\text{оп}} \frac{p_{1\text{х}}}{p_{1\text{оп}}} \sqrt{\frac{T_{1\text{оп}}}{T_{1\text{х}}}}$
7	$h_{\text{пер}}$ $h_{\text{и пр}}$	—			9,0	9,0	9,0			По $i-s$ диаграмме, рис. 5-8, а
8	$x_{\text{пр}}$	—			0,928	0,920	0,908			То же
9	$h_{\text{вд}}$ $h_{\text{и пр}}$	—			66,0	74,0	85,0			»

№ пп.	Изменяе- мый па- раметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		p_1, t_1, p_2	p_1		t_1			p_2		Способ определения
10	$h'_{и2 пр} 1; 2$	83,0					72,3	81,0	89,8	$h'_{и пр} + h'_{и пр} \left(\frac{1 + x_{пр}}{2} \right)$
11	β_{h_0}	0,965					1,0	1,0	1,0	$h'_{и2 пр} : h'_{и2 оп}$
12	$\Delta h_{и p2}$	-3,0					-7,7	0	-9,8	$h'_{и2 х} - h'_{и2 пр}$
13	$h_{и2 х}$	72,3					80	80	80	$\beta_{h_0} h_{и2 оп} + \Delta h_{и p2}$
14	$\beta_{h_{и}}$	0,93					1,16	1,0	1,0	$h_{и2 х} : h_{и2 оп}$

¹ Штрих сверху означает условное использованное теплопадение для всего процесса с учетом влияния конечной влажности (сухости) пара.

² Или $h_{и2 пр}$ для $p_{2 пр}$ по рис. 5-8, б, построенному по данным п. 10 в графах 6, 7, 8.

³ $h'_{и2 х}$ — см. п. 5 или п. 10 в графе 7; либо см. $\Delta h_{и p2}$ на стр. 265, п. 6.

Для численного примера в графах 1 и 6—8 дано: $p_{1 оп} = 1,45 \text{ ата}$; $p_{1 х} = 125^\circ \text{ С}$; $t_{1 х} = 120^\circ \text{ С}$; $p_{2 оп} = 0,045 \text{ ата}$; $p_{2 х} = 0,05 \text{ ата}$; $h_{и2 оп} = 78 \text{ ккал/кг}$ ($\eta_{во оп} = 0,62$).
Для граф 6—8 принято: $\eta_{во х} = \eta_{во оп} = 0,7$; $\Delta p_2 = 0,02 \text{ ата}$.

Точка $A_{оп}$ на изобаре $p_{2 оп}$ (рис. 5-8, а) получена для среднего значения $\eta_{во} = 0,7$; аналогично получена точка A_x .

К табл. 5-6 необходимо сделать некоторые пояснения.

1. Столбец 1 относится к случаю отклонения всех параметров от заданных значений $p_{1 х}$, $t_{1 х}$, $p_{2 х}$.

2. Для определения поправки на отклонение одного из параметров задаются величинами Δp_1 и $\Delta p_2 = 0,02$; 0,5; 1 или 2 ата и $\Delta t_1 = 10$ или 20° С — соответственно пределам возможного их отклонения.

3. При заданных значениях $p_{1 х}$, $t_{1 х}$, $p_{2 х}$ все приведенные величины пп. 7—9 зависят только от значения $p_{2 пр}$; их вписывают в столбцы 6—8 и строят по ним график рис. 5-8, б: $h'_{и2 пр} = f(p_{2 пр})$; пользуясь этим графиком, заполняют пп. 10—14 столбцов 1—5; данные столбца 7 относятся к параметрам $p_{1 х}$, $t_{1 х}$, $p_{2 х}$.

4. По данным пп. 11 и 14 в столбцах 2—8 можно построить графики поправок к мощности (к использованному теплопадению) на отклонение одного из параметров для «сквозного» и отборных потоков пара $\beta_{h_{и}}$ и β_{h_0} или график общей поправки для всей проточной части с учетом доли отборов пара (рис. 5-8, в).

5. И использованное теплопадение для всех потоков пара, кроме «сквозного», будет равно:

$$h_{и х} = h_{и оп} \beta_{h_0},$$

а использованное теплопадение для «сквозного» потока составит:

$$h_{и2 х} = h_{и оп} \beta_{h_{и}}.$$

Для обратного перехода, например от $p_{1 х}$ к $p_{1 оп}$, будем иметь:

$$h_{и оп} = h_{и х} : \beta_{h_0}; \quad h_{и2 оп} = h_{и2 х} : \beta_{h_{и}}.$$

6. При наличии опытной поправки к мощности последних ступеней на изменение p_2 , п. 12 определяется из выражения

$$\Delta h_{и p2} = \frac{0,860 \Delta' N_{p2} (p_{2 х} - p_{2 пр})}{D_2},$$

где D_2 — расход пара на выходе из проточной части, т/ч ; $\Delta' N_{p2}$ — опытная поправка (со знаком минус) к мощности при повышении p_2 на 1 ата, квт/ата .

При этом значение $\Delta h_{и p2}$ зависит от величины D_2 .

Поправка ΔN_{p_2} может быть учтена отдельно в киловаттах (см. стр. 260).

7. Влияние влажности пара существенно при значительных отклонениях начальных параметров (давление — более 10%, температура — выше 10°C) и заметной (больше 20%) доле теплопадения в зоне влажного пара, т. е. для ч. н. д. турбины с регулируемым отбором пара. В прочих случаях им можно пренебречь.

В отношении определения приведенного теплопадения $h_{нх}$ для различных потоков пара необходимо сделать еще несколько замечаний.

1. В случае дроссельного парораспределения величины $h_{02оп}$ и $h_{02х}$ следует определять не от состояния свежего пара, а от состояния пара за дроссельным клапаном, принимая его давление равным опытному, а теплосодержание — равным теплосодержанию свежего пара $i_{др} = i_1$ (см., например, п. 35 таблицы в приложении 7-2).

Для нагрузки выше экономической считают раздельно два потока пара: 1) до камеры перегрузки и 2) от камеры до выхлопа, определяя их начальное давление из выражения

$$p_x = \frac{p_{1x}}{p_{1оп}} p_{оп}$$

2. В случае большого отклонения давления $p_{оп}$ в камере регенеративного отбора пара во время опытов (например вследствие увеличенного расхода пара из отбора, повышенного конечного давления p_2 — в камере последующего регулируемого отбора) для отсека проточной части до этого отбора принимают $\eta_{во х} = \eta_{во оп}$ с некоторой погрешностью, а $h_{ох}$ — по $i-s$ диаграмме. При этом давление в камере отбора при условиях характеристики p_x° находят в зависимости от расхода пара D_x через последующий отсек из выражения

$$\frac{D_x'}{D_{оп}} = \sqrt{\frac{(p_x^\circ)^2 - (p_{2х})^2}{(p_{оп}^\circ)^2 - (p_{2оп})^2}}$$

где $p_{2х}$ и $p_{2оп}$ — давления в камере следующего отбора (см., например, приложение 5-7).

3. Когда изменения параметров p_1 , t_1 , p_2 вызывают относительно большое изменение теплопадения h_{02} (при $\frac{p_2}{p_1} > 0,1$), ошибка за счет допущения $\eta_{во х} = \eta_{во оп}$ может

быть значительной, и поэтому поправки на отклонение всех параметров следует определить опытным путем. Эти опыты, проводимые при изменениях только одного параметра, требуют тем большей тщательности измерений, соблюдения режимов работы и их устойчивости, чем меньше величина h_{02} .

4. Определение приведенной мощности на зажимах генератора

Мощность на зажимах генератора определяют из выражения

$$N_{эх} = N_x - \Delta N_{эмх},$$

или

$$N_{эх} = N_x \eta_{эмх},$$

где N_x — см. выше; $\Delta N_{эмх}$ или $\eta_{эмх}$ определяют по форме приложения 5-3.

5-4. ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ

По величинам, приведенным в приложении 5-6, для установки без регулируемых отборов пара нетрудно построить тепловые характеристики: по расходу пара $D_{1х} = f(N_{эх})$, по расходу тепла $Q_1 = f(N_{эх})$, по теплофикационной выработке электроэнергии $N_{эх} = f(Q_x^T)$ для установки типа П.

Расход тепла на установку и на выработку электроэнергии определяют по формуле, которую составляют в зависимости от тепловой схемы (см. § 1-4).

Характеристики основных элементов установки строят по следующим данным:

а) характеристику проточной части $p_x = f(D_{1х})$ — по опытным величинам $D_{1оп}$ и $p_{оп}$ (с учетом замечаний на стр. 266), а характеристику $\eta_{во х} = f(D_{1х})$ — по величинам $D_{1х}$ и $\eta_{во х}$ из приложения 5-6;

б) характеристики парораспределения $D_{1х} = f(z^{см})$, $p_{2х}^{кл} = f(D_{1х})$ и $z^{кл} = f(z^{см})$ — по величинам $D_{1х}$, $z_{оп}^{см}$, $p_{2х}^{кл} = p_{2оп}^{кл} \frac{p_{1х}}{p_{1оп}}$ и $z_{оп}^{кл}$ (см. § 3-4);

в) характеристики подогревателей $t_{к; пит2х}^п = f(D_{1х})$ и $\delta t_x^п = f(D_{1х})$ — по опытным величинам $D_{1оп}$, $t_{к; пит2оп}$,

$\delta t_{оп}^н$ (см. замечания на стр. 255), где $D_{1оп}$ — расход пара на входе в проточную часть (ч. в. д., ч. с. д., ч. н. д.), из которой поступает пар на данный подогреватель, поскольку этим расходом определяется давление пара у подогревателя, для турбин с регулируемым отбором пара. Для ч. в. д. в качестве $D_{1оп}$ может быть принят расход свежего пара;

г) характеристику конденсатора $p_{2х} = f(D_x^к)$ и $\delta t_x^к = f(D_x^к)$ — по опытным величинам $D_{оп}^к$, $p_{2оп}$, $\delta t_{оп}^к$, с указанием условий опытов.

Примерное оформление перечисленных характеристик приведено в приложении 3-8.

Для установок с регулируемыми отборами пара строят такие же исходные характеристики, как в приложении 3-8, по величинам, приведенным в приложении 5-6, а затем переходят к построению диаграмм режимов по расходу пара и тепла, которое ввиду его сложности излагается в следующем параграфе.

5-5. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ РЕЖИМОВ ПО РАСХОДУ ПАРА И ТЕПЛА ДЛЯ УСТАНОВКИ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ОТБОРАМИ ПАРА (ТИПОВ ВПТ-25 и ВТ-25)

1. Расчет и построение верхней части диаграммы режимов по расходу пара для турбины с двумя отборами (основной диаграммы для турбины с одним регулируемым отбором)

а) Расчет

Метод расчета и построения диаграммы режимов для турбины с одним регулируемым отбором и верхней части диаграммы режимов для турбины с двумя отборами принципиально один и тот же.

Расчет к диаграмме режимов составляют по форме приложения 5-8 (форма дана для турбины с двумя отборами), пользуясь результатами ряда вспомогательных расчетов (в том числе приложения 5-7) и построенными по ним графиками, о которых будет сказано ниже.

Формулы и способ определения всех величин, включая расход тепла на установку, приведены в специальной графе приложения 5-8, а необходимые пояснения даны в примечаниях.

В дополнение к приложению 5-8 приводим общую схему расчета, причем квадратные скобки относятся к установке с одним регулируемым отбором пара.

1. Задаваясь рядом режимов с расходами свежего пара D_1 от минимума до максимума через 5, 10 или 20 $m^3/ч$, и для каждого из них с расходами пара на выходе из ч. с. д. $D_2^{ч.с.д.}$ [на входе в ч. н. д. $D_1^{ч.н.д.}$] от минимума до максимума с любым из указанных интервалов, определяют мощность установки для всех этих режимов как сумму мощностей ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. [ч. в. д. и ч. н. д.] по их исходным характеристикам. Расход пара из второго отбора $D_т$ считают равным нулю.

2. К полученной по п. 1 мощности вводят поправки на отклонения реального процесса от условий исходных характеристик, связанные с режимом нагрузки отдельных частей турбины.

3. Из внутренней мощности установки (по п. 1) с учетом поправок (по п. 2) вычитают механические потери в турбине и потери в генераторе $\Delta N_{эм}$, либо умножают мощность на электромеханический к. п. д. $\eta_{эм}$.

У всех буквенных обозначений здесь, как и на соответствующих рисунках и в приложениях 5-6, 5-7, 5-8, индексы «х» и «х'» опущены, за исключением величин, входящих в условия характеристики, например $p_{пх}$ и $p_{тх}$.

Принятие определенных значений $D_2^{ч.с.д.}$ [$D_1^{ч.н.д.}$] позволяет в дальнейшем легко определить зависящий от них расход пара из регулируемого отбора на регенерацию (из промышленного отбора на шестиятмосферный деаэратор) и, как остаток баланса пара, выходящего из ч. в. д. — промышленный отбор $D_{п}$ [$D_т$].

Максимальные значения $D_2^{ч.с.д.}$ [$D_1^{ч.н.д.}$] с учетом влияния расхода свежего пара, или температуры пара после ч. в. д., как и вся зона «естественного» повышения давления в камере регулируемого отбора после ч. в. д., легко определяются на рис. 5-9, построенном по данным приложения 5-7. Наряду с поправками рис. 5-9 представляет взаимную зависимость величин D_1 , $D_2^{ч.с.д.}$ и $p_{п}$ [аналогично D_1 , $D_1^{ч.н.д.}$, $p_т$].

К зоне «естественного» повышения давления относятся все данные (опытные и приведенные), полученные для полного открытия парораспределения проточной части, следующей за камерой данного отбора. Начало этой зоны

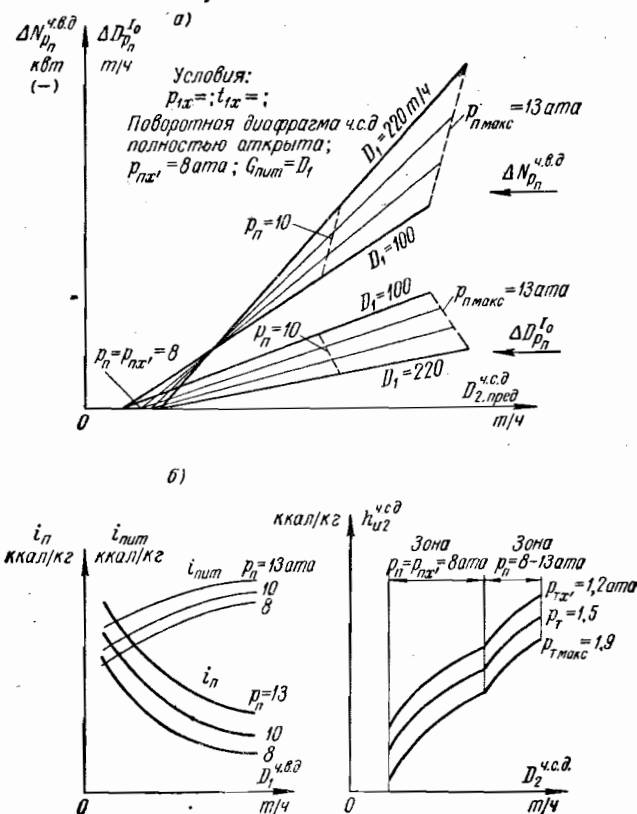


Рис. 5-9. Поправки к характеристике проточной части (ч. в. д., ч. с. д.) на «естественное» повышение давления на выходе (по приложению 5-7): а—поправка к мощности ч. в. д. и к расходу пара из регенеративного отбора; б—теплосодержание пара на выходе из ч. в. д. в зависимости от его давления; в—использованное теплопадение в ч. с. д. в зависимости от давления пара на выходе.

Примечания: 1. При двух регулируемых отборах пара тепло-содержание пара теплофикационного отбора

$$i_t = i_{пн} - h_{ч.с.д.}$$

2. В установке с одним регулируемым отбором пара заменяются:

$p_{пн}$ на p^T ; $D_{2\text{макс}}$ на $D_{1\text{макс}}$ на рис. а; $i_{пн}$ на i^T ; $p_{пн}$ на p^T на рис. б.

отвечает давлению в камере, принятому для тепловой характеристики, а в условиях опытов — тому, на которое установлен регулятор. Максимально допустимое давление в отборе определяет верхнюю границу этой зоны.

Наименьшее значение D_1 для диаграммы режимов можно принять в зависимости от практической надобности, равной, например, $0,2-0,3 D_{1\text{макс}}$ или соответственно минимальному опытному значению.

Расчет по приложению 5-7 производят для определения поправки к мощности ч. в. д. на «естественное» повышение давления на выходе при больших пропусках пара в ч. с. д. [ч. н. д.]. Поправка учитывает изменение давления и расхода пара регенеративного отбора из ч. в. д.

В приложении 5-7 в специальной графе указаны формулы и способ определения всех величин и даны необходимые пояснения в примечаниях.

График температуры (теплосодержания) питательной воды, помещенный на рис. 5-9 для давления $p_{пх}$, заимствуют из приложения 3-8 (рис. 3) для ч. в. д., а для других давлений — строят путем прибавления $\Delta i_{пит}$ по п. 5 приложения 5-7 к значениям $i_{пит}$ при $p_{пх}$.

График использованного теплопадения ч. с. д. на рис. 5-9 строят по данным приложения 5-6, а для давлений p_T больше p_{tx} — по данным приложения 5-7, составленного для ч. с. д. при соответствующих значениях p_T от минимума до максимума. В данном случае предельное значение p_T может быть ограничено максимально допустимым пропуском пара в ч. н. д.

Кроме поправки по рис. 5-9 к мощности ч. в. д., в расчет диаграммы режимов вводят еще две поправки к мощности — на отклонение температуры пара на входе в ч. с. д. [ч. н. д.] и на увеличенный отсос пара из передних уплотнений в ч. с. д. [ч. н. д.] против условий их исходных характеристик. Пояснения к этим поправкам и соответствующие ссылки даны в приложении 5-8 и в п. 5.

б) Построение

1. По величинам D_1 , $D_{пн}$ и N_9 [D_1 , D^T и N_9] из приложения 5-8 строят вспомогательную диаграмму зависимости $D_{пн} = f(N_9; D_1)$ [$D^T = f(N_9; D_1)$] — см. рис. 5-10.

2. По величинам D_1 , $D_2^{ч.с.д.}$, N_9 [D_1 , $D_1^{ч.н.д.}$, N_9] из приложения 5-8 и с помощью рис. 5-10 строят диаграмму режимов по расходу пара (рис. 5-11):

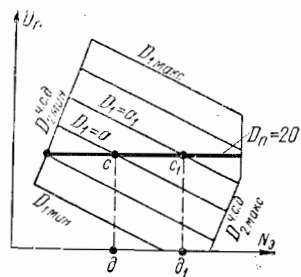


Рис. 5-10. Построение вспомогательной диаграммы $N_2 = f(D_1)$ при $D_p = \text{const}$ или $N_2 = f(D_1)$ при $D_T = \text{const}$ для установки с двумя или с одним регулируемым отборами пара.

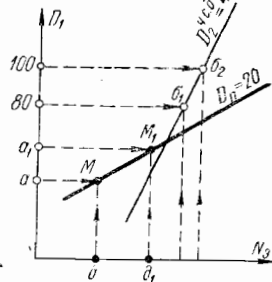


Рис. 5-11. Построение диаграммы режимов по расходу пара для установки с двумя регулируемым отборами пара (верхней части диаграммы) или с одним отбором.

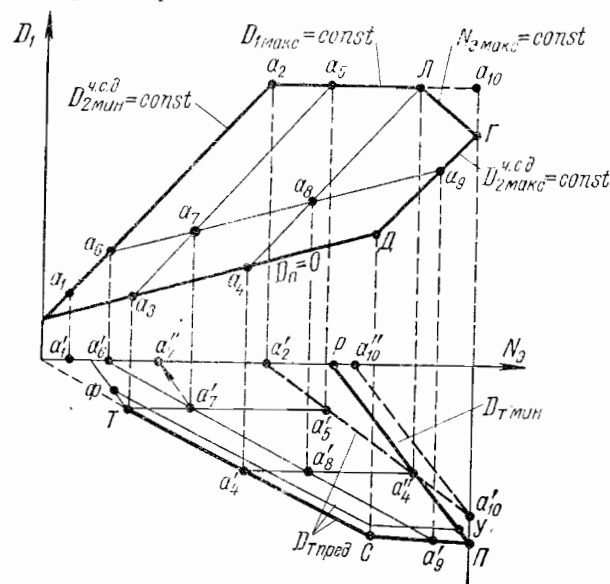


Рис. 5-12. Построение полной диаграммы режимов по расходу пара и ее граничных линий для установки с двумя регулируемым отборами пара.

а) линии $D_1 = f(N_2)$ — по данным для всех одинаковых значений $D_2^{\text{ч. н. д.}}$ $[D_2^{\text{ч. н. д.}}]$, см. точки b_1, b_2 на рис. 5-11;

б) линии $D_1 = f(N_2)$ — при значениях $D_p = \text{const}$ $[D_T = \text{const}]$ от нуля до максимума через 5, 10 или 20 $m^3/ч$ — по соответствующим величинам D_1 и N_2 из рис. 5-10 (см. точки C, C_1 и M, M_1 на рис. 5-10 и 5-11 для $D_p = 20$).

В результате построения получаются также граничные линии диаграммы режимов для постоянных значений: $D_{1\max}$, $D_{1\min}$, $D_2^{\text{ч. н. д.}}$ $[D_2^{\text{ч. н. д.}}]$, $D_2^{\text{ч. н. д.}}$ $[D_2^{\text{ч. н. д.}}]$, $D_p = 0$ — см. рис. 5-12.

Зона режимов нагрузки при «естественном» повышении давления в камере первого регулируемого отбора для большей ясности на рис. 5-12 не заштрихована.

О граничных линиях и точках диаграммы режимов по расходу пара см. также § 1-4.

2. Расчет и построение нижней части диаграммы режимов по расходу пара для установки с двумя регулируемым отборами

Как отмечалось ранее, с включением теплофикационного отбора пара D_T сокращается расход пара в ч. н. д. на величину $\Delta D_1^{\text{ч. н. д.}} = D_T$, и мощность установки при заданных величинах D_1 и $D_2^{\text{ч. н. д.}}$ становится меньше, чем по верхней части диаграммы режимов, на величину ΔN_T , равную уменьшению мощности ч. н. д.:

$$\Delta N_T = \Delta N^{\text{ч. н. д.}} = \frac{D_T}{a^{\text{ч. н. д.}}}$$

В случае, когда из регулируемого отбора перед ч. н. д. осуществляется отбор пара на регенерацию (в подогреватель № 2 по рис. 5-4), представляется удобным на исходной характеристике ч. н. д. построить (и затем уже спрямить) график зависимости внутренней мощности ч. н. д. от суммарного расхода пара в ч. н. д. и на регенерацию, связанную с нагрузкой ч. н. д. по расходу конденсата, или так называемого «фиктивного» расхода пара в ч. н. д. (рис. 5-13):

$$D_{1\text{ф}}^{\text{ч. н. д.}} = D_1^{\text{ч. н. д.}} + D^{\text{II}};$$

при этом

$$D_T = D_2^{ч.с.д} - D_{1ф}^{ч.н.д},$$

а при данном значении $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ имеем:

$$\Delta D_T = \Delta D_{1ф}^{ч.н.д}.$$

Пользуясь выражением

$$D_{1ф}^{ч.н.д} = a_{ф}^{ч.н.д} N^{ч.н.д},$$

определяют величину ΔN_T из выражения

$$\Delta N_T = \Delta N^{ч.н.д} = \frac{D_T}{a_{ф}^{ч.н.д}}.$$

Оценив изменение потерь в генераторе (их переменную часть) средней величиной δN_g в процентах от мощности установки, определяют уменьшение мощности на зажимах генератора:

$$\Delta N_{эТ} = \frac{D_T}{a_{ф}^{ч.н.д}} \left(1 - \frac{\delta N_g}{100} \right) = B D_T.$$

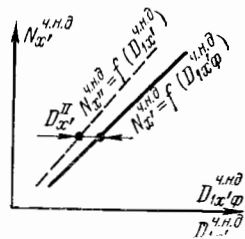


Рис. 5-13. Внутренняя мощность ч. н. д. в зависимости от фиктивного расхода пара на входе.

Следует принять во внимание, что с включением теплофикационного отбора при данном расходе пара в ч. с. д. величина отсоса пара в пятый отбор (в ч. н. д.) сохраняется неизменной, вследствие чего мощность ч. н. д. снижается несколько меньше, чем по ее характеристике $N = f(D_1)$, построенной с учетом отсоса пара при

$D_T = 0$, т. е. соответственно расходу пара на входе в ч. н. д. Эта поправка на 1 м/ч пара отбора составляет:

$$\Delta N_{упл}^{ч.н.д} = \pm \frac{D_{упл}^{Vo} (h_{и2} - h_{и}^{Vo})^{ч.н.д}}{D_{2х}^{ч.с.д} \cdot 860} \text{ [квт/м]}$$

(множителем $1 - \frac{\delta N_g}{100}$ пренебрегаем). С учетом этой поправки получаем:

$$B = \frac{1}{a_{ф}^{ч.н.д}} \left(1 - \frac{\delta N_g}{100} \right) - \Delta N_{упл}^{ч.н.д}.$$

Для турбины типа ВПТ-25 $\Delta N_{упл}^{ч.н.д} \approx 1,5 \text{ квт/м}$, или около 0,015В.

Величина В [Мвт/м] служит угловым коэффициентом прямолинейной характеристики $\Delta N_{э} = f(D_T)$ в нижней части диаграммы режимов (рис. 5-12), где проводят следующие граничные линии:

а) линию РП — допустимого уменьшения теплофикационного отбора $D_{Т мин}$ при максимальной мощности установки $N_{э макс}$, проходящую через точку Р ($N_{э макс}$) с угловым коэффициентом В. Для большей ясности рисунка вспомогательные линии, параллельные РП и проходящие через деления шкалы $N_{э}$, не показаны;

б) линию ТСП наибольшего теплофикационного отбора пара $D_{Т пред}$ при данном расходе пара на выходе из ч. с. д. $D_2^{ч.с.д}$ и наименьшем пропуске пара в ч. н. д. $D_{1ф мин}^{ч.н.д}$.

Линия ТСП проведена по ординатам $D_{Т пред} = D_2^{ч.с.д} - D_{1ф мин}^{ч.н.д}$, отложенным на вертикалях, проходящих через точки пересечения линий $D_n = 0$ и $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ в верхней части диаграммы; на данной вертикали указанное значение $D_2^{ч.с.д}$ является наибольшим.

Величина $D_{1ф мин}^{ч.н.д}$ возрастает с увеличением заданного давления в камере теплофикационного отбора за счет увеличения расхода в ч. н. д. и регенеративного отбора пара (на подогреватель № 2 по рис. 5-4).

Каждой линии $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$ в верхней части диаграммы отвечает своя горизонтальная линия $D_{Т пред}$ в нижней — см. соответствующие линии $a_3 a_5$ и $T a_5$; $a_4 I$ и $a'_4 a'_4$ и связывающие их пунктирные линии.

Линия СП, отвечающая максимальному расходу пара на выходе из ч. с. д. при $p_{п макс} = \text{const}$ и проводимая до пересечения с линией РП, имеет небольшой уклон вниз за счет некоторого увеличения расхода $D_{2 макс}^{ч.с.д}$ (вследствие понижения температуры пара в отборе) при увеличении расхода свежего пара.

Если спроектировать на нижнюю часть диаграммы точки пересечения линий $D_n = \text{const}$ с линиями $D_2^{ч.с.д} = \text{const}$, то в нижней части можно провести линии $D_n = \text{const}$, соответствующие предельным значениям $D_{Т пред}$ — см. линии $a_6 a_7 a_8$ и $a'_6 a'_7 a'_8$; такие линии проводят в нижней части диаграммы, и они позволяют определить наибольший теплофикационный отбор $D_{Т пред}$ и минимальную мощность $N_{э мин}$, получаемых при заданных значениях D_1 и D_n — см., например, пунктир $a'_4 a'_7$ для режима в точке a_7 .

Граничным линиям в верхней части диаграммы отвечают свои линии в нижней, а именно:

а) линиям $D_{п} = 0$ и $D_{2\text{макс}}^{\text{ч.с.д}}$ или $a_3ДГ$ отвечает линия $ТСП$ ($D_{т\text{пред}}$);

б) линии $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}}$ или a_1a_2 отвечает линия $a'_1a'_2$ из условия, что при $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}}$ величина $D_{т\text{пред}} = 0$;

в) линии $D_{1\text{макс}}$ или $a_2Л$ отвечает линия $a'_2a'_4$ ($D_{т\text{пред}}$);

г) линия $ЛГ$ ограничения расхода свежего пара по $N_3 = N_{3\text{макс}}$ сама «проектируется» с нижней части диаграммы и отвечает участку $a'_4П$ совпадения линий $D_{т\text{пред}}$ и $D_{т\text{мин}}$.

Линия $ФУ$ аналогична линии $ТСП$ и относится к максимальному давлению в камере теплофикационного отбора, когда пропуск пара в ч. н. д. $D_{1ф\text{мин}}$ имеет наибольшее значение, а $D_{т\text{пред}}$ — наименьшее.

Работа в зоне $Лa_{10}Г$ в верхней части диаграммы режимов возможна лишь с превышением номинальной мощности установки на величину Pa''_{10} в масштабе N_3 . При этом линиям $Лa_{10}$ и $a_{10}Г$ в верхней части диаграммы отвечают соответственно линии $a'_4a'_{10}$ ($D_{т\text{пред}}$) и $a'_{10}П$ — в нижней.

Линия $a'_{10}a'_{10}$ является новой границей $D_{т\text{мин}}$ (см. также § 1-4).

3. Построение диаграммы режимов по расходу тепла на установку

1. По величинам D_1 , $D_{п}$, $Q_{п}$ и Q_1 приложения 5-8 строят два вспомогательных графика (или один совмещенный) зависимости $Q_1 = f(D_1; D_{п})$ и $Q_{п} = f(D_1; D_{п})$ — рис. 5-14. Величина Q_1 зависит от $D_{п}$ в зоне «естественного» повышения давления после ч. в. д., вследствие повышения тепло содержания питательной воды.

2. Задаваясь рядом округленных значений $Q_{п}$ от нуля до максимума через 5, 10 или 20 Мккал/ч, определяют по рис. 5-14 соответствующие значения $D'_{п}$ для всех принятых выше значений D_1 .

3. По найденным величинам $D'_{п}$ определяют величины Q'_1 по рис. 5-14 для тех же значений D_1 .

4. По величинам $D'_{п}$ и D_1 определяют мощность установки N'_3 , пользуясь диаграммой режимов по расходу пара (рис. 5-12).

Все найденные в пп. 2 и 3 величины вписывают в графы 29—32 приложения 5-8.

5. Наконец, по величинам Q'_1 , $Q'_{п}$ и N'_3 строят диаграмму режимов по расходу тепла $Q_1 = f(N_3; Q_{п})$ — см. рис. 1-47, так же как диаграмму режимов по расходу пара.

На линиях $Q_{п}$ и на оси ординат Q_1 пишут соответствующие пределы величин $D_{п}$ и D_1 по рис. 5-12, меняющихся вследствие изменения теплосодержания питательной воды и пара отбора в зоне «естественного» повышения давления и с изменением расхода свежего пара.

Граничные линии диаграммы сносят с диаграммы режимов по расходу пара по соответствующим величинам D_1 , $D_{п}$ и N_3 .

Подобным образом строят диаграмму режимов по расходу тепла для установки с одним регулируемым отбором пара, где вместо $D_{п}$ и $Q_{п}$ откладывают величины D^T и Q^T .

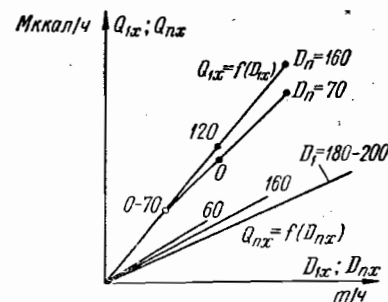


Рис. 5-14. Построение вспомогательной диаграммы $Q_1 = f(D_1; D_{п})$ и $Q_{п} = f(D_1; D_{п})$ для установки с двумя регулируемыми отборами пара и $Q_1 = f(D_1; D^T)$; $Q^T = f(D_1; D^T)$ для установки с одним регулируемым отбором.

4. Построение нижней части диаграммы режимов по расходу тепла для установки с двумя регулируемыми отборами пара

Нижнюю часть диаграммы режимов по расходу тепла строят в виде ряда параллельных линий, проводимых через деления шкалы N_3 с одинаковым угловым коэффициентом

$$B_T = \frac{\Delta N_{ЭТ}}{Q_T} = \frac{B}{(i_{тх} - 100) \cdot 1000} \text{ [Мвт/Мккал]},$$

где B — угловой коэффициент, Мвт/м;

$i_{тх}$ — теплосодержание пара теплофикационного отбора по исходной характеристике ч. н. д., ккал/кг;

100 — принятое теплосодержание возвращаемого конденсата, ккал/кг.

На оси ординат Q_T в скобках пишут соответствующие значения D_T при указанном выше теплоиспользовании пара отбора.

Граничные линии нижней части диаграммы, так же как и верхней, сносят с диаграммы режимов по расходу пара. Так, например, для построения линии $Q_{T \text{ пред}}$ проведенные на нижней части диаграммы наклонные линии с угловым коэффициентом B_T продолжают до пересечения с вертикалями, проходящими через те же значения N_3 , на которых лежат концы соответствующих наклонных линий в диаграмме по расходу пара (проекция линий $N_3 = \text{const}$ на ось N_3 в обеих диаграммах равны).

Через точки указанных пересечений проводят линии $Q_{T \text{ пред}}$ (при $Q_{\Pi} = \text{const}$).

5. Поправки к диаграммам режимов для установки с двумя регулируемыми отборами пара

В дополнение к диаграмме режимов по расходу пара строят ряд кривых для поправок, которые не могли быть учтены ранее при расчете и построении диаграммы:

а) поправки $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ на уменьшение мощности ч. с. д. при «естественном» повышении давления в камере теплофикационного отбора;

б) поправки $\Delta N_x^{ч.н.д.}$ на отклонение спрямленной характеристики $N^{ч.н.д.} = f(D_{1ф}^{ч.н.д.})$ от действительной, построенной на основании опытных данных;

в) поправки $\Delta N_{i_T}^{ч.н.д.}$ на изменение мощности ч. н. д. за счет отклонения теплосодержания (температуры) пара в камере теплофикационного отбора от значения, принятого для исходной характеристики ч. н. д.

Метод определения поправок в основном сводится к следующему.

1. Поправку к мощности ч. с. д. $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ на повышение давления на выходе определяют расчетом, как и аналогичную поправку к мощности ч. в. д., — см. приложение 5-7, примечание п. 9.

По величинам $D_1^{ч.с.д.}$; $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ и D_T из приложения 5-7 (пп. 1, 9 и 14) строят сначала вспомогательный график (рис. 5-15) зависимости $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.} = f(D_T)$ для ряда

постоянных значений $D_1^{ч.с.д.} = \text{const}$. Затем, проводя на этом графике вертикали через ряд округленных значений $D_T = \text{const}$, находят поправку $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ для каждого из них в точках пересечений с линиями $D_1^{ч.с.д.} = \text{const}$.

Величины $D_1^{ч.с.д.}$ заменяют соответствующими им на исходной характеристике ч. с. д. величинами $D_2^{ч.с.д.}$, и по полученным значениям D_T , $D_2^{ч.с.д.}$ и $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ строят окончательный график зависимости $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.} = f(D_2^{ч.с.д.})$ для ряда значений $D_T = \text{const}$ (подобный рис. 5-18, I см. ниже).

2. Для определения поправки на характеристику ч. н. д. $\Delta N_x^{ч.н.д.}$ используется рис. 2, а приложения 3-8 исходной

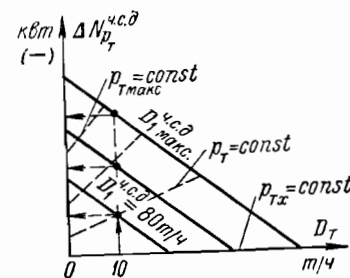


Рис. 5-15. График поправки к мощности ч. с. д. $\Delta N_{p_T}^{ч.с.д.}$ на «естественное» повышение давления в камере теплофикационного отбора турбины с двумя отборами.

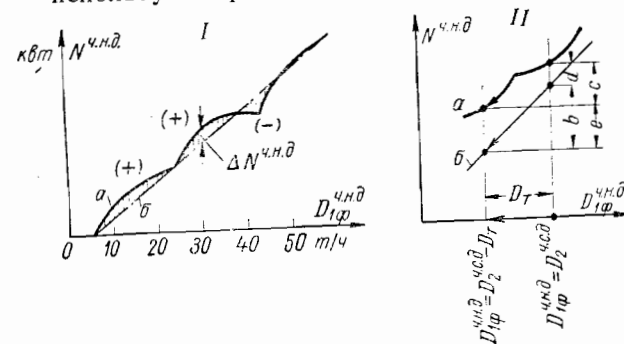


Рис. 5-16. Совмещение действительной и спрямленной характеристик $N = f(D_1)$ ч. н. д. турбины с двумя отборами и погрешность спрямления: I — действительная характеристика ч. н. д.; II — спрямленная характеристика ч. н. д.

характеристики ч. н. д., на котором проводят спрямленную линию $N_x^{ч.н.д.} = f(D_{1ф}^{ч.н.д.})$, использованную ранее при построении нижней части диаграммы режимов (см. рис. 5-16, I).

Как следует из построения верхней части диаграммы режимов, поправка к мощности по ней при всех значениях $D_2^{ч.с.д.}$ равна нулю, если $D_T = 0$; при этом $D_{1ф}^{ч.н.д.} = D_2^{ч.с.д.}$.

С включением теплофикационного отбора уменьшение мощности ч. н. д. по спрямленной характеристике b (см. поясняющий рис. 5-16, II) будет отличаться от ее уменьшения по действительной, исходной характеристике c на величину

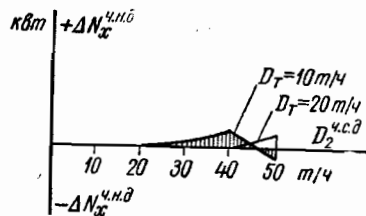


Рис. 5-17. График поправки к мощности $\Delta N_x^{ч.н.д.}$ на спрямление характеристики $N = f(D_1)$ ч. н. д. турбины с двумя отборами.

$$\Delta N_x^{ч.н.д.} = \Delta N_1^{ч.н.д.} - \Delta N_2^{ч.н.д.},$$

или

$$e - d = b - c,$$

поскольку

$$b + d = e + c,$$

где $\Delta N_1^{ч.н.д.} = e$ — величина разности мощностей ч. н. д. по спрямленной и действительной характеристикам при $D_{1ф}^{ч.н.д.} = D_2^{ч.с.д.} - D_T$;

$\Delta N_2^{ч.н.д.} = d$ — то же, при $D_{1ф}^{ч.н.д.} = D_2^{ч.с.д.}$.

На этом основании строят график зависимости $\Delta N_x^{ч.н.д.} = f(D_2^{ч.с.д.} \text{ и } D_T)$. Откладывая по горизонтали округленные значения $D_2^{ч.с.д.}$ от минимума до максимума: $D_{2\min}^{ч.с.д.} = 20; 30 \dots \text{ м/ч}$, проводят вертикали через эти значения и на них откладывают величины $\Delta N_x^{ч.н.д.}$ для одинаковых значений $D_T = 0; 10; 20 \dots \text{ м/ч}$; полученные точки соединяют (рис. 5-17).

Величины $\Delta N_x^{ч.н.д.}$ находят следующим образом. Пользуясь графиком $N^{ч.н.д.} = f(D_{1ф}^{ч.н.д.})$, определяют для каждого выбранного значения $D_2^{ч.с.д.}$ величины $\Delta N_1^{ч.н.д.}$ — для $D_{1ф}^{ч.н.д.} = D_2^{ч.с.д.} - D_T$ и $\Delta N_2^{ч.н.д.}$ — для $D_{1ф}^{ч.н.д.} = D_2^{ч.с.д.}$, после чего находят

$$\Delta N_x^{ч.н.д.} = \Delta N_1^{ч.н.д.} - \Delta N_2^{ч.н.д.},$$

с сохранением знака поправки, поскольку излишнему уменьшению мощности отвечает поправка с плюсом.

3. На основании графиков, указанных в пп. 1 и 2, строят графики суммарной поправки $\Delta N_{p_t}^{ч.с.д.} + \Delta N_x^{ч.н.д.}$ в зависимости от $D_2^{ч.с.д.}$ для различных постоянных значений $D_T = 0; 10; 20 \dots \text{ м/ч}$ — рис. 5-18, I.

4. Поправку значения $\Delta N_{i_t}^{ч.н.д.}$ к мощности ч. н. д. на тепло-содержание или температуру пара в камере теплофикационного отбора в зависимости от расходов пара в ч. в. д. и ч. с. д. определяют следующим образом.

По величинам $D_2^{ч.с.д.}$, i_t и $D_{п}$ из приложения 5-8 (пп. 2, 15 и 19) строят сначала вспомогательный график зависимости $\delta N_{i_t}^{ч.н.д.} = f(D_{п})$ для ряда постоянных значений $D_2^{ч.с.д.} = \text{const}$, определяя поправку $\delta N_{i_t}^{ч.н.д.}$

в долях единицы по рис. 5-8 для ч. н. д. в зависимости от соответствующей величины i_t .

От этого графика, как показано выше для поправки $\Delta N_{p_t}^{ч.с.д.}$, переходят к графику зависимости $\delta N_{i_t}^{ч.н.д.} = f(D_2^{ч.с.д.})$ при различных значениях $D_{п} = \text{const}$ (рис. 5-18, II).

Задаваясь рядом округленных значений $D_2^{ч.с.д.} - D_T$, определяют для каждого из них поправку $\Delta N_{i_t}^{ч.н.д.}$ в зависимости от величины $\delta N_{i_t}^{ч.н.д.}$ из выражения

$$\Delta N_{i_t}^{ч.н.д.} = \delta N_{i_t}^{ч.н.д.} (D_2^{ч.с.д.} - D_T) B \cdot 1000 [\text{квт}],$$

где B — угловой коэффициент наклонных линий $N_3 = \text{const}$ в нижней части диаграммы режимов, Мвт/м .

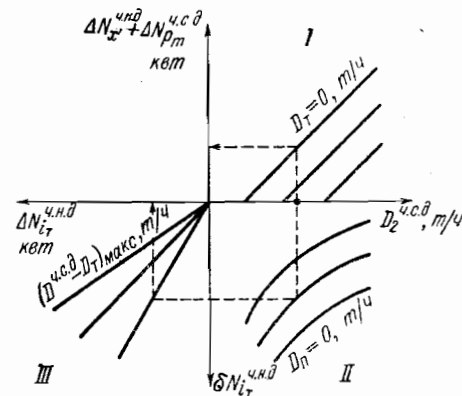


Рис. 5-18. Графики поправок к мощности установки по диаграмме режимов на «естественное» повышение давления пара в камере теплофикационного отбора и на его теплосодержание.

По величинам $D_2^{ч.с.д} - D_T$; $\delta N_{i_T}^{ч.н.д}$ и $\Delta N_{i_T}^{ч.н.д}$ строят график рис. 5-18, III.

Все поправки можно применять без учета к. п. д. генератора.

Таким образом, диаграмма режимов состоит из самой диаграммы и поправок к ней (рис. 5-18), внесение которых полностью устраняет допущенные при ее построении погрешности против реального процесса турбины с двумя регулируемы отборами пара при всевозможных режимах нагрузки.

Для определения по диаграмме расхода свежего пара при заданных значениях D_n , D_T и N_s поправки по кривым рис. 5-18 вводят к заданной мощности N_s с обратным знаком, и ее новое значение вместе с заданными D_n и D_T откладывают на диаграмме режимов (см. пример на стр. 83).

Повышение теплосодержания $i_{п,т}$ отбираемого пара (как и пара противодавления) связано со снижением удельной теплофикационной выработки $y_{п,т}$ по двум причинам:

1) уменьшение среднего использованного теплопадения Δh_n или выработки электроэнергии на 1 т отбираемого пара;

2) увеличение количества тепла, отпускаемого 1 т пара (теплоиспользования $i_{п,т} - i_K$).

Коэффициент изменения величины $y_{п,т}$ равен:

$$\beta_{y_{п,т}} = \frac{\beta_N}{\beta_{Q_{п,т}}} = \frac{\beta_{h_n}}{\beta_{i_{п,т}}} = \frac{1 - \delta h_n}{1 + \delta i_{п,т}},$$

где δh_n — относительное уменьшение теплопадения в долях единицы:

$$\delta h_n = \frac{\Delta h_n}{h_n},$$

$\delta i_{п,т}$ — относительное повышение теплоиспользования отбираемого пара:

$$\delta i_{п,т} = \frac{\Delta h_n}{i_{п,т} - i_K}.$$

При построении тепловой диаграммы режимов в зоне «естественного» повышения давления — как промышленного отбора, так и теплофикационного — учитываются

оба указанных явления путем определения выработки электроэнергии и отпуска тепла для реального процесса в отношении промышленного отбора (приложение 5-8, п. 9) и в виде специальных поправок ΔN_{i_T} и ΔN_{p_T} (см. ниже) для теплофикационного отбора пара.

К диаграмме режимов по расходу тепла вводят указанные выше поправки к мощности по рис. 5-18, а также поправку ΔN_{i_T} на спрямление линий в нижней части диаграммы по расходу тепла с учетом изменения теплосодержания пара теплофикационного отбора.

График поправки ΔN_{i_T} строят следующим образом.

По данным приложения 5-8 (пп. 1, 19 и 32) строят график зависимости $\Delta' N_{i_T} = f(D_1; D_n)$ — рис. 5-19, I. Затем, задаваясь рядом округленных значений $Q_T = \text{const}$, определяют для каждого из них поправку ΔN_{i_T} [квт] в зависимости от величины $\Delta' N_{i_T}$ из выражения

$$\Delta N_{i_T} = \Delta' N_{i_T} Q_1.$$

После этого по величинам Q_T , $\Delta' N_{i_T}$ и ΔN_{i_T} строят график рис. 5-19, II.

К диаграмме режимов по расходу тепла в зоне «естественного» повышения давления (p_T) теплофикационного отбора, кроме поправок по рис. 5-18 и 5-19, I, II, следует ввести еще дополнительную поправку ΔN_{p_T} на повышение теплоиспользования ($i_T - i_{T, \text{нас}}$) пара отбора, связанное с повышением его теплосодержания (i_T). Для этого по величинам $\Delta h_{n2}^{ч.с.д}$, $D_2^{ч.с.д}$ и D_T приложения 5-7, пп. 8 (10) 11 и 14 строят график (рис. 5-19, III) зависимости $\Delta' N_{p_T} = f(D_2^{ч.с.д})$ для ряда значений $D_T = \text{const}$ (с промежуточным переходом, аналогично построению графика рис. 5-18, I — см. выше).

Величину $\Delta' N_{p_T}$ определяют в зависимости от величины $\Delta h_{n2}^{ч.с.д}$ из выражения

$$\Delta' N_{p_T} = \frac{\Delta h_{n2}^{ч.с.д}}{i_T - i_{T, \text{нас}}} \approx \frac{\Delta h_{n2}^{ч.с.д}}{550},$$

где $\Delta h_{n2}^{ч.с.д}$ и $\Delta' N_{p_T}$ со знаком плюс, поскольку в данном случае при неизменном отпуске тепла Q_T отбор пара сокращается, а его расход в ч. н. д. повышается против

их значений, предусмотренных в тепловой диаграмме режимов, следовательно, мощность по ней оказывается заниженной.

Задаваясь рядом округленных значений $Q_T = \text{const}$, определяют для каждого из них поправку ΔN_{p_T} [квт] в зависимости от величины $\Delta' N_{p_T}$ из выражения

$$\Delta N_{p_T} = \Delta' N_{p_T} Q_T B_T \cdot 1000 \text{ [квт]},$$

где B_T — угловой коэффициент наклонных линий $N_3 = \text{const}$ в нижней части диаграммы режимов, Мвт/ч .

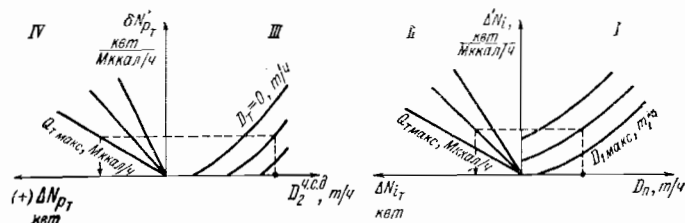


Рис. 5-19. Графики поправок к мощности установки по тепловой диаграмме режимов на изменения теплоспользования пара теплофикационного отбора.

По величинам Q_T , $\Delta' N_{p_T}$ и ΔN_{p_T} строят график рис. 5-19, IV.

С учетом всех поправок расход тепла на установку при заданном режиме нагрузки N_3 , $Q_{п}$ и Q_T определяют следующим путем:

1) на диаграмме режимов по расходу тепла находят приближенные значения Q_1 и D_1 , $D_{п}$, D_T — по величинам в скобках, соответственно значениям N_3 , $Q_{п}$ и Q_T ;

2) по рис. 5-18 и 5-19 находят суммарную поправку к мощности установки:

$$\Delta N_3 = \Delta N_{p_T}^{ч.с.д.} + \Delta N_{x'}^{ч.н.д.} + \Delta N_{i_T}^{ч.н.д.} + \Delta N_{i_T} + \Delta N_{p_T} \text{ [квт]};$$

3) на диаграмме режимов по расходу тепла находят окончательное значение Q_1 для режима $N_{3ф}$, $Q_{п}$ и Q_T , где

$$N_{3ф} = N_3 - \Delta N_3;$$

здесь ΔN_3 — в Мвт ,

Значение $N_{3ф}$ следует подставлять и в аналитические выражения [(1-24) и (1-28)] для расхода пара и тепла на установку. При этом они имеют следующий вид:

$$D_1 = D_{xx} + a(N_3 - \Delta N_3) + \epsilon_{п} D_{п} + \epsilon_T D_T;$$

$$Q_1 = Q_{xx} + b(N_3 - \Delta N_3) + c_{п} Q_{п} + c_T Q_T,$$

где ΔN_3 — поправки к мощности по рис. 5-18;

$\Delta N_3'$ — то же, по рис. 5-18 и 5-19.

Следует отметить также следующие выражения:

$$\epsilon_T = aB; \quad c_T = bB_T.$$

Аналитические выражения диаграмм режимов являются приближенными, так как они относятся к спрямленным, параллельным линиям $D_{п} = \text{const}$ и $D_2^{ч.с.д.} = \text{const}$.

Расход тепла на установку можно также определить, исходя из величин удельного прироста теплофикационной выработки электроэнергии и разбивая всю мощность установки на составляющие — конденсационную и теплофикационную. В этом случае

$$Q_1 = Q_3 + Q_{п} + Q_T;$$

$$Q_3 = Q_{xx} + bN_3^K + 0,860N_3^T; \quad \eta_{эм},$$

где

$$N_3^T = y_{рп} Q_{п} + y_{рТ} Q_T;$$

$$N_3^K = N_3 - \Delta N_3 - N_3^T.$$

Значения $y_{рп}$ и $y_{рТ}$ определяют приближенно из коэффициентов (c) при $Q_{п}$ и Q_T в основном выражении для расхода тепла (см. стр. 93), а более точно — из графиков зависимости $y_{рп}$ и $y_{рТ}$ от Q_1 , $Q_{п}$ и Q_T , которые строят по данным расчета диаграмм режимов (приложение 5-8, пп. 2, 9, 15, 16 и 20).

В зоне «естественного» повышения давления в камере теплофикационного отбора определение величин N_3^K и N_3^T связано с применением специальных поправок.

К тепловой характеристике установки, в частности к диаграмме режимов, составляют поправочные кривые и на эксплуатационные отклонения условий работы установки от условий характеристики, например отклонение параметров свежего пара, давления в регулируемых отборах и на выхлопе, расхода питательной воды и кон-

денсата. Поправки вносят в расход свежего пара, тепла на установку или в удельную теплофикационную выработку электроэнергии по характеристике.

Поправки определяют экспериментальным либо расчетным путем по изменению теплопотока, как это показано выше в параграфе о приведении опытных величин к условиям характеристики.

Экспериментальное определение поправок требует соблюдения постоянства всех параметров при изменении только данного параметра, как, например, в случае определения поправки на вакуум (см. гл. 8).

Проще использовать имеющиеся проектные поправочные кривые либо данные типовых характеристик для подобных установок.

Для турбины с регулируемыми отборами пара нужны отдельные поправки к расходу тепла на конденсационную выработку электроэнергии $\beta_{h_n}^k$ и к удельной теплофикационной выработке отборным паром $\beta_{h_n}^T$. Поправки определяют обычным путем по изменению теплопотока в зависимости от начальных параметров и конечного давления (соответственно в конденсаторе и в камере отбора).

Поправочный множитель β_{Q_1} к расходу тепла зависит от режима нагрузки установки и определяется как отношение расходов тепла при заданных параметрах (Q_1) и по характеристике (Q_{1x}):

$$\beta_{Q_1} = \frac{Q_1}{Q_{1x}}.$$

Величины Q_{1x} и Q_1 получают из выражений

$$Q_{1x} = Q_{xx} + b_x N_{\text{эx}}^k + 0,860 N_x^T;$$

$$Q_1 = (Q_{xx} + b_x N_{\text{э}}^k) \frac{1}{\beta_{h_i}^k} + 0,860 N_x^T \beta_{h_i}^T;$$

здесь

$$N_{\text{эx}}^k = N_{\text{э}} - N_x^T \eta_{\text{эм}};$$

$$N_{\text{э}}^k = N_{\text{э}} - N_x^T \eta_{\text{эм}} \beta_{h_i}^T;$$

при двух регулируемых отборах

$$N_x^T = N_{\text{пx}} + N_{\text{tx}} = y_{\text{п}} Q_{\text{п}} + y_{\text{т}} Q_{\text{т}};$$

$$\beta_{h_i}^k = \beta_{h_i}^k \rho_i^k \approx \frac{h_{\text{и2}}^k}{h_{\text{и2x}}^k} \cdot \frac{i_1 - i_{\text{пит. т}}}{i_1 - i_{\text{пит. х}}};$$

$$\beta_{h_i}^T = \left(\frac{\beta_{h_{\text{п}}}}{\beta_{i_{\text{п}}}} N_{\text{пx}} + \frac{\beta_{h_{\text{т}}}}{\beta_{i_{\text{т}}}} N_{\text{tx}} \right) : (N_{\text{пx}} + N_{\text{tx}}),$$

где

$$\beta_{h_{\text{п}(\text{т})}} = \frac{h_{\text{ип}(\text{т})}}{h_{\text{ип}(\text{т})\text{х}}}; \quad \beta_{i_{\text{п}(\text{т})}} = \frac{i_{\text{п}(\text{т})} - i_{\text{кп}(\text{т})}}{i_{\text{п}(\text{т})\text{х}} - i_{\text{кп}(\text{т})\text{х}}};$$

$h_{\text{и2}}^k$ и $h_{\text{ип}(\text{т})}$ — использованное теплопотока «сквозного» потока пара в конденсатор и пара соответствующих индексам (п, т) отборов;

$i_{\text{п}(\text{т})}$ и $i_{\text{кп}(\text{т})}$ — теплосодержание пара отборов и его конденсата;

$N_{\text{э}}$, $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{т}}$ — заданные значения мощности установки и отпуска тепла паром промышленного и теплофикационного отборов.

Значения внутреннего относительного к. п. д. проточной части до отбора $\eta_{\text{во2х}}$ принимают по характеристике соответственно режиму нагрузки.

Заводские расчетные поправки обычно относятся к определению расхода свежего пара в эксплуатационных условиях. Имея эти поправки (β_{D_1}) или определяя их, пользуясь рекомендуемым заводом методом, легко получить поправки к расходу тепла на установку β_{Q_1} из выражения

$$\beta_{Q_1} = \frac{D_{1\text{оп}} i_{1\text{оп}} - G_{\text{пит. оп}} i_{\text{пит. оп}}}{D_{1x} (i_1 - i_{\text{пит. х}})},$$

где

$$D_{1\text{оп}} = \beta_{D_1} D_{1x};$$

$D_{1\text{оп}}$; D_{1x} — расходы свежего пара при данных опытных или фактических условиях и по заводской характеристике согласно индексам;

i_1 и $i_{\text{пит.}}$ — теплосодержания свежего пара (по p_1 и t_1) и питательной воды при тех же условиях согласно индексам;

$G_{\text{пит.}}$ — расход питательной воды при данных условиях.

При этом предполагается равенство $D_{1x} = G_{\text{пит. х}}$.

При условии равенства $D_{1\text{оп}} = G_{\text{пит. оп}}$

$$\beta_{Q_1} = \beta_{D_1} \beta_t,$$

где

$$\beta_t = \frac{i_{1\text{оп}} - i_{\text{пит. оп}}}{i_{1x} - i_{\text{пит. х}}}.$$

Если $p_{1\text{оп}} = p_{1x}$ и $t_{1\text{оп}} = t_{1x}$, например в случае поправки на расход питательной воды, то в приведенном выражении $i_{1\text{оп}} = i_{1x}$; теплосодержание питательной воды должно быть известно.

В том случае, когда проектные поправочные кривые используются для приведения опытных данных к условиям характеристики (например в гл. 9), их следует применять с обратным знаком.

В приложении 5-11 представлена реальная диаграмма режимов для турбины типа ВПТ-25 и заводские поправочные кривые к ней, заимствованные из [Л. 27].

5-6. СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА ОБ ИСПЫТАНИИ

В отчет об испытании паротурбинной установки включают:

- 1) данные о техническом состоянии, условиях и режиме работы установки во время испытания;
- 2) данные о методе измерений и подсчета опытных и приведенных величин;
- 3) сводную таблицу результатов испытания;
- 4) графические тепловые характеристики установки и ее основных элементов;
- 5) анализ показателей экономичности и основных характеристик установки путем сравнения с данными, выбор которых определяет руководитель испытания.

Для сравнения могут служить:

- 1) гарантии завода-изготовителя;
- 2) проектные, расчетные данные;
- 3) результаты прежних испытаний, а также испытаний других однотипных установок;
- 4) типовые энергетические характеристики;
- 5) данные лучших аналогичных установок — отечественных и зарубежных;
- 6) местные эксплуатационные данные и нормы.

Сравниваемые данные приводят к одинаковым условиям.

Для сравнения с гарантиями определяют расход пара и тепла по полученным тепловым характеристикам для гарантийных режимов нагрузки и приводят их к гарантийным условиям по системе поправок, рекомендуемой в гарантиях или принятой в отчете по испытанию установки (см. приложение 5-9).

Кроме того, выявляют положительные и отрицательные отклонения всех показателей экономичности, указывают причины и дают цифровую оценку этих отклонений; отмечают причины, ограничивающие минимум и максимум электрической и паровой нагрузки установки.

Дают рекомендации по повышению мощности (паровой, электрической), экономичности и надежности работы установки путем улучшения:

а) тепловой схемы, технического состояния и обслуживания (очистка, ремонт, реконструкция или модернизация отдельных элементов, автоматизация);

б) режима нагрузки (увеличение отборов пара, снижение давления пара в камерах регулируемых отборов и на выхлопе);

в) оперативного контроля и учета показателей работы (применение совершенных приборов, более правильная регистрация и обработка результатов измерений, оценка погрешностей основных эксплуатационных приборов: электросчетчиков, ваттметров, расходомеров, регистраторов температуры питательной воды и др.);

г) нормирования показателей экономичности работы установки.

Следует иметь в виду, что неточность измерения регулируемых параметров: мощности генератора, температуры свежего пара, давления пара — свежего, регулируемых отборов и выхлопа — приводит не только к неправильной оценке работы установки, но и к действительному снижению экономичности или надежности ее работы.

Рекомендуемые мероприятия должны быть оправданы указанием их эффективности (в тоннах условного топлива или в рублях за год) и срока окупаемости.

Особого внимания требуют характерные по длительности режимы нагрузки и условия работы установки.

Объем отчета по возможности сокращают путем применения рациональных форм с четкими пояснениями и формулами расчета.

Журналы наблюдений, протоколы, акты и другие вспомогательные материалы, не вошедшие в отчет, должны быть систематизированы и в полном порядке храниться в ЭЛ в течение установленного срока.

Пример объяснительной записки к отчету приведен в приложении 5-10.

Образцы типовых тепловых характеристик паротурбинных установок, в том числе диаграммы режимов для турбин с одним и двумя регулируемыми отборами пара, даны в [Л. 25].

* * *

В заключение сделаем некоторые дополнительные замечания, касающиеся в основном оформления и содержания диаграмм режимов для турбин с двумя регулируемыми отборами пара.

1. На диаграммах режимов по расходу пара и тепла приводят все условия тепловой характеристики, включая принципиальную тепловую схему и графики поправок, а также основные аналитические выражения и пример пользования ими (см. приложение 5-11).

Кроме того, помещают графики зависимостей удельного прироста теплофикационной выработки электроэнергии $y_{рп} = f(Q_1)$ и $y_{рт} = f(Q_r)$ для ряда значений $Q_n = \text{const}$. Подставляя средние значения $y_{рп}$ и $y_{рт}$ по графикам в уравнение $\beta^* = y^* \left(b - \frac{860}{\eta_{эм}} \right)$, следует проверить коэффициенты при Q_n и Q_r в приближенном выражении для расхода тепла на установку (1-28):

$$Q_1 = Q_{xx} + b(N_s - \Delta N_s) + C_n Q_n + C_r Q_r,$$

полученном из геометрического построения диаграммы режимов.

2. С переходом в зону «естественного» повышения давления в камерах регулируемых отборов (практически сверх необходимого потребителям давления) экономичность установки снижается:

а) линии $D_n = \text{const}$ на границе этой зоны, т. е. на линии $D_{пред}^{ч.с.д.}$ при $p_n = p_{пх}$, имеют излом в сторону увеличения расхода свежего пара;

б) мощность установки уменьшается на величину поправки по рис. 5-18 — при $p_r > p_{тх}$.

3. При сравнении характеристики режима $D_n = 0$ и $D_r = 0$ по верхней части диаграммы с конденсационным режимом при выключенных регуляторах давления следует иметь в виду, что первая характеристика при больших расходах пара ($D_2^{ч.с.д.}$) требует существенной поправки к мощности (со знаком минус) на повышение давления после ч. с. д.

4. Величины $y_{рп}$ и $y_{рт}$ удельного прироста теплофикационной выработки электроэнергии (см. стр. 93) могут служить (с присущей им погрешностью) для экономического распределения тепловой нагрузки между различными установками (в том числе типа П) в порядке убывания величин y .

Для распределения нагрузки правильнее пользоваться характеристиками, построенными в зависимости от отпущенной электроэнергии или мощности, которую получают вычитанием из мощности на зажимах генератора затраты мощности на собственные нужды установки (в основном на циркуляционные и конденсатные насосы). С этой целью в конце таблиц-приложений 5-1, 5-6 и 5-8 добавляют три пункта (не учитывая расход тепла на собственные нужды установки при его ничтожной величине):

расход электроэнергии (мощности) на собственные нужды установки $N_{сн}$;

отпущенную мощность установки

$$N_{э\text{отп}} = N_s - N_{сн};$$

удельный расход тепла на отпущенную электроэнергию

$$q_{1\text{отп}} = \frac{Q_1}{N_{э\text{отп}}},$$

или для турбин типа П удельный теплофикационный отпуск электроэнергии

$$y_{отп} = \frac{N_{э\text{отп}}}{Q^*}.$$

В установках с регулируемыми отборами пара и с конденсатором расход на собственные нужды следует вычитать из мощности ч. н. д., от которой зависит расход на конденсатные и циркуляционные насосы; это можно учесть в исходной характеристике ч. н. д.

5. При пользовании диаграммой режимов необходимо учитывать одно важное условие характеристики — температуру (теплосодержание) возвращаемого от потре-

бителей конденсата и место его включения в регенеративную схему установки.

На тепловой схеме по рис. 5-2 для турбины типа ВПТ-25 конденсат пара промышленного отбора возвращается в деаэрактор 6 *ата*, где он подогревается паром того же отбора. Дальнейший его подогрев осуществляется паром отбора из ч. в. д. Поэтому удельная теплофикационная выработка для пара промышленного отбора с учетом регенеративного отбора из ч. в. д. определяется как удельная выработка 1 *т* пара на выходе из ч. в. д. (см. приложение 5-8, п. 9) при температуре возвращаемого конденсата, в данном случае равной его температуре на выходе из деаэрактора.

В условиях характеристики предусматривается энергетически равноценная схема, при которой температура возвращаемого конденсата на входе в деаэрактор принимается равной его температуре на выходе из него, и расход пара на подогрев конденсата до этой температуры включается, таким образом, в производственный отбор $D_{\text{п}}$. Эта величина ($D_{\text{п}}$) откладывается на диаграмме режимов, и при указанных условиях она не зависит от фактической температуры конденсата, возвращаемого потребителями. Поэтому следует иметь в виду, что фактический расход пара на деаэрактор больше полученного в расчете на величину

$$\Delta D^{\text{д}} = \left(\frac{i_{\text{п}} - i_{\text{кп}}}{i_{\text{п}} - i_{\text{к2}}^{\text{д}}} - 1 \right) D_{\text{потр}},$$

а промышленный отбор $D_{\text{п}}$ на ту же величину больше фактического отпуска пара $D_{\text{потр}}$ потребителю.

Зная $D_{\text{потр}}$, нужно на диаграмме режимов откладывать

$$D_{\text{п}} = \beta_{\text{ик}} D_{\text{потр}},$$

где

$$\beta_{\text{ик}} = \frac{i_{\text{п}} - i_{\text{кп}}}{i_{\text{п}} - i_{\text{к2}}^{\text{д}}}.$$

Полученные выражения поясняются следующим примером. Для турбины типа ВПТ-25, при температуре возвращаемого конденсата производственного отбора $t_{\text{кп}} = 100^{\circ}\text{C}$, температуре на выходе из деаэрактора 6 *ата* $t_{\text{к2}}^{\text{д}} = 158^{\circ}\text{C}$ и при $i_{\text{п}} = 730$ ккал/кг, получаем:

$$\beta_{\text{ик}} \approx \frac{730 - 100}{730 - 158} = \frac{630}{572} = 1,10,$$

т. е. в данном примере расход пара $D_{\text{п}}$, откладываемый на диаграмме режимов, должен быть на 10% больше расхода, непосредственно отпускаемого потребителю.

По отпуску тепла указанная поправка не требуется. Отпуск тепла определяется из выражения

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{п}} = D_{\text{п}} (i_{\text{п}} - i_{\text{к2}}^{\text{д}}) \cdot 10^3 [\text{Мккал/ч}].$$

Для установок, где конденсат пара промышленного отбора нагревается тем же паром до температуры его насыщения $t_{\text{к нас}}$ (или близкой к ней, например в схемах турбин типа ВПТ-25 с подогревателем № 4 после деаэрактора), следует в приведенных выражениях для $\Delta D^{\text{д}}$ и $Q_{\text{п}}$ оставить $i_{\text{к2}}^{\text{д}}$, а при определении удельной теплофикационной выработки электроэнергии пара отбора (приложение 5-8, п. 9) принять $i_{\text{п нас}}$ вместо $i_{\text{к2}}^{\text{д}}$.

Кроме того, расход пара промышленного отбора в расчете диаграммы режимов (приложение 5-8, п. 19) нужно определять без учета расхода D^{IV} на подогреватель № 4 из выражения

$$D_{\text{п}} = D_2^{\text{ч.в.д.}} - D_1^{\text{ч.с.д.}} - D^{\text{д6}} - D^{\text{IV}}.$$

Если в реальных условиях схема подогрева возвращаемого конденсата не отвечает условиям характеристики, необходимы специальные поправки на соответствующие изменения как регулируемых, так и нерегулируемых отборов пара.

6. Наряду с приложениями к главе пятой в отчет включаются приложения 3-2, 3-4, 3,7 и 3,8.

Приложения к пятой главе

(в отчет включаются также приложения 3-2, 3-4, 3-7 и 3-8) 5-1. Сводная таблица результатов испытания 5-2. Расход основного конденсата по диафрагме 5-3. Расход пара на регенеративный подогрев конденсата 5-4. Внутренняя мощность и внутренний относительный к. п. д. проточной части в условиях опытов 5-5. Электромеханические потери и к. п. д. установки 5-6. Внутренняя мощность проточной части (расход пара и тепла и к. п. д. установки) при условиях характеристики 5-7. Поправка к мощности проточной части (ч. в. д., ч. с. д.) на «естественное» повышение давления на выходе 5-8. Расчет к построению диаграмм режимов по расходу пара и тепла для установки с регулируемым отбором пара 5-9. Сравнение с гарантиями приведенного опытного расхода свежего пара 5-10. Отчет о тепловом испытании паротурбинной установки.

Сводная таблица результатов испытаний

№ пп.	Наименование величины		Обозначение величины	Единица измерения	Номера опытов			Способ определения, измерительный прибор
	Дата опыта				1	2	3	
1								
2	Режим нагрузки	Угол поворота кулачкового вала ч. в. д.	φ					Заводской указатель
3		Подъем поршня сервомотора, ч. в. д.	см ч. в. д.	мм				
4		Подъем поршня сервомотора, ч. с. д.	см ч. с. д.	»				
5		Подъем поршня сервомотора, ч. н. д.	см ч. н. д.	»				
6		Расход свежего пара, включая расход на эжектор	D_1	т/ч				Кольцевая диафрагма с двухстекольным дифманометром — приложение 5-2
7		Расход пара производственного отбора	D_{II}	»				
8	Расход паротеплофикационного отбора	D_T	»				То же (на конденсате из бойлеров) — приложение 5-2	
9	Включение регуляторов давления и подогревателей	—	—					
10	Генератор	Мощность на зажимах генератора	$N_э$	квт				Схема двух ваттметров с трансформаторами и приборами класса 0,5 Два амперметра класса 0,5 Вольтметр класса 0,5 Приложение 5-5
11		Ток	I	а				
12		Напряжение	U	в				
13		Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	%				
14		К. п. д.	η_T	%				
15		Барометрическое давление	B	мм рт. ст.				Ртутный чашечный барометр

Пар в ч. в. д. (пар в турбине)

16	перед стопорным клапаном	Расход	D_1 ч. в. д.	т/ч				Приложение 5-4 Манометр класса 0,35, шкала 0—160 кг/см ² Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 300—600°С Таблицы ВТИ, 1958 г.
17		Давление	p_1	атм				
18		Температура	t_1	°С				
19		Теплосодержание	i_1	ккал/кг				
20	за регулирующими клапанами	Давление за клапанами:						Манометр класса 0,35, шкала 0—160 кг/см ² То же » »
21		I	p_2 кл	атм				
22		II	p_2 кл	»				
23		III	p_2 кл	»				
24	в регулирующей ступени	Давление	$p_{рс}$ ч. в. д.	»				Манометр класса 0,35, шкала 0—160 кг/см ² Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 300—600°С Таблицы ВТИ, 1958 г.
25		Температура	$t_{рс}$ ч. в. д.	°С				
26		Теплосодержание	$i_{рс}$ ч. в. д.	ккал/кг				
27		Расход	D_{10}	т/ч				
28	I отбор	Давление	p_{10}	атм				Уравнение теплового баланса П. № 5 — приложение 5-3 Манометр класса 0,35, шкала 0—60 кг/см ² Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 200—400°С Таблицы ВТИ, 1958 г.
29		Температура	t_{10}	°С				
30		Теплосодержание	i_{10}	ккал/кг				

№ п. п.	Наименование величины		Обозначение величины	Единица измерения	Номера опытов			Способ определения, измерительный прибор
	Испытание	ата опыта			1	2	3	
31	Пар в ч. в. д. (пар в турбине)	Расход	$D_2^{\text{ч. в. д.}}$	m^3/q				Уравнение несового баланса пара в ч. в. д. Манометр класса 0,35, шкала 0—25 Kr/cm^2 Потенциометр ЭПП-09, ХХ, шкала 200—400° С Таблицы ВТИ, 1958 г. По t — s диаграмме
32		Давление (слева, справа, для ч. н. д.)	$P_{\text{п}}$	atm				
33		Температура (слева, справа для ч. н. д.)	$t_{\text{п}}$	°C				
34		Теплосодержание	$i_{\text{п}}$	$kcal/kg$				
35		Влажность (для ч. н. д.)	$1-x$	%				
	Пар в ч. с. д.			См. пар в ч. в. д.				
	Пар в ч. н. д.			См. пар в ч. в. д.				
	в III оборот	Расход	$D_{\text{III о ул}}$	m^3/q				Кольцевая диаграмма с двухствольным дифманометром — приложение 5-2 Манометр класса 0,35, шкала 0—12 Kr/cm^2 Потенциометр ЭПП-09, ХХ, шкала 300—300° С Таблицы ВТИ, 1958 г.
		Давление	$P_{\text{III о ул}}$	atm				
		Температура	$t_{\text{III о ул}}$	°C				
		Теплосодержание	$i_{\text{III о ул}}$	$kcal/kg$				
	них уплотнений							

наз из перед	в V отбор	Расход	V_o $D_{\text{упл}}$	м/ч	Кольцевая диафрагма с двухствольным дифференциальным манометром — приложение 5-2 Ртутный манометр
		Давление	V_o $p_{\text{упл}}$	атм	
		Температура	t_o $t_{\text{упл}}$	°C	
		Теплосодержание	i_o $i_{\text{упл}}$	ккал/кг	
наз из перед	ч. в. д.	Использованное теплопадение	$h_{\text{ч. в. д.}}$ h_{H_2}	ккал/кг	$i_1 - i_{\text{п}}$ $i - s$ диаграмма для P_1, t_1 и P_2 $\left(\frac{h_{\text{ч. в. д.}} \cdot h_{\text{O}_2}}{h_{\text{H}_2}} \right) \cdot 100$
		Располагаемое теплопадение	h_{O_2} $h_{\text{ч. в. д.}}$	»	
		К. п. д.	η_{H_2} η_{O_2}	%	
		Использованное теплопадение	$h_{\text{ч. с. д.}}$ h_{H_2}	ккал/кг	
наз из перед	ч. с. д.	Располагаемое теплопадение	h_{O_2} $h_{\text{ч. с. д.}}$	»	$i - s$ диаграмма для $P_{\text{п}}, t_{\text{п}}, P_1$ $\left(\frac{h_{\text{ч. с. д.}} \cdot h_{\text{O}_2}}{h_{\text{H}_2}} \right) \cdot 100$
		К. п. д.	η_{O_2} η_{H_2}	%	
		Использованное теплопадение	$h_{\text{ч. н. д.}}$ h_{H_2}	ккал/кг	
		Располагаемое теплопадение	h_{O_2} $h_{\text{ч. н. д.}}$	»	
наз из перед	ч. н. д.	К. п. д.	η_{H_2} η_{O_2}	%	$i_{\text{T}} - i_2$ (приложение 5-4, п. 7) $i - s$ диаграмма для $P_{\text{T}}, t_{\text{T}}, P_2$ $\left(\frac{h_{\text{ч. н. д.}} \cdot h_{\text{O}_2}}{h_{\text{H}_2}} \right) \cdot 100$
		Использованное теплопадение	$h_{\text{ч. н. д.}}$ h_{H_2}	ккал/кг	
		Располагаемое теплопадение	h_{O_2} $h_{\text{ч. н. д.}}$	»	
		К. п. д.	η_{H_2} η_{O_2}	%	

№ п.п.	Наименование величины		Обозначение величины	Единица измерения	Номера опытов			Способ определения, измерительный прибор
	Дата опыта				1	2	3	
1	турбины	Использованное теплопа- дение	$h_{из}$	ккал/кг				$i_1 - i_2$
		Располагаемое теплопаде- ние	$h_{ог}$	%				$i - s$ диаграмма для P_1, t_1, P_2 ($h_{из} \cdot h_{ог} \cdot 100$)
	турбины	К п. д.	$\eta_{во2}$	%				$860 N / \Sigma D h_o$ — по приложе- нию 5-4, п. 13 $860 N_o / \Sigma D h_o$
		Внутренний относительный к. п. д. турбины Относительный электрический к. п. д. установки	$\eta_{во}$ $\eta_{ог}$	% %				Уравнение теплового балан- са П. № 5 — приложение 5-3 Манометр класса 0,35, шка- ла 0—50 кг/см ² Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 200—400° С Таблицы ВТИ, 1958 г. Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 0—300° С
Ватель № 5	пар	Расход	D^V	т/ч				
		Давление на входе	P^V	атм				
		Температура на входе	t^V	°С				
		Температура насыщения на входе	$t^V_{нас}$	°С				
		Температура дренажа	$t^V_{др}$	°С				
Подогре	питательная вода	Расход	$G^V_{пит}$	т/ч				Кольцевая диафрагма с двухстеклянным дифманомет- ром — приложение 5-2
		Температура на входе	$t^V_{пит 1}$	°С				Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 0—300° С
		Температура на выходе	$t^V_{пит 2}$	°С				То же
		Температурный напор	δt^V	°С				$t^V_{нас} - t^V_{пит 2}$
		Конечная температура после обвода	$t^V_{пит}$	°С				Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 0—300° С, лаборатор- ный ртутный термометр
Эжектор	пар	См. подогреватель № 5						
		Расход	D^3_1	т/ч				Сопла эжектора
		Давление на входе	P^3_1	атм				Манометр класса 0,5—1,5, шкала 0—30 кг/см ²
	конденсат	Температура на входе	t^3_1	°С				Потенциометр ЭПП-09, ХК, шкала 300—600° С
		Расход (через холоди- льник)	G^3_k	т/ч				Кольцевая диафрагма с двухстеклянным дифманомет- ром — приложение 5-2
Давление паро-воздушной смеси на входе		Температура на входе	$t^3_{к1}$	°С				Лабораторный ртутный тер- мометр
		Температура на выходе	$t^3_{к2}$	°С				То же
		Давление паро-воздушной смеси на входе	$P^3_{вс}$	атм				Ртутный манометр

№ п.п.	Наименование величины		Обозначение величины	Единица измерения	Номера опытов			Способ определения, измерительный прибор
	Дата опыта				1	2	3	
1	пар	Расход (включая отсос из задних уплотнений) . . .	D^k	m^3/h				Уравнение теплового баланса пара — приложение 5-4 Ртутный манометр Таблицы ВТИ, 1958 г.
		Давление в горловине (справа, слева)	p^k	atm				
		Температура насыщения Паровая нагрузка	$t^k_{нас}$ $D^k \cdot F^k$	$^{\circ}C$ $kg/m^2 \cdot h$				
	конденсат	Расход	G^k_k	m^3/h				$G^k_k = G^k_k$ Лабораторный ртутный термометр $t^k_{нас} - t^k_k$
		Температура на выходе	t^k_k	$^{\circ}C$				
		Переохлаждение	Δt^k	$^{\circ}C$				
	щадя вода	Расход	$\dot{W}^k$	m^3/h				Уравнение теплового баланса конденсатора — приложение Лабораторный ртутный термометр с ценою делений $0,1^{\circ}C$ То же ,
		Температура на входе . .	$t^k_{в1}$	$^{\circ}C$				
		Температура на выходе слева	$t^k_{в2 \text{ лев}}$	$^{\circ}C$				
		Температура на выходе справа Температура на выходе	$t^k_{в2 \text{ пр}}$	$^{\circ}C$				

Конденсатор	охлаждаю	средняя	$t_{в2 \text{ ср}}$	$^{\circ}C$				$W^k : D^k \left(\frac{t_{в2 \text{ лев}} + t_{в2 \text{ пр}}}{2} - \frac{t_{в2 \text{ ср}} - t_{в1}}{530} \right)$ $t^k_{нас} - t^k_{в2 \text{ ср}}$ $W^k (t_{в2 \text{ ср}} - t_{в1}) / F \cdot \Delta t_{ср}$ — см. стр. 46
		Кратность охлаждения . .	m	—				
		Температурный напор . .	δt^k	$^{\circ}C$				
		Коэффициент теплопередачи	k	$ккал/m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C$				
Установка при условиях характеристики		Мощность на зажимах генератора	$N_{эx}$	$квт$				Приложение 5-6 Приложение 5-6 $D_{1x} : N_{эx}$ Приложение 3-8, рис. 3
		Расход свежего пара на турбину	D_{1x}	m^3/h				
		Удельный расход пара на выработку электроэнергии	d_{1x}	$kg/kвт \cdot h$				
		Температура питательной воды	$t_{пит \ x}$	$^{\circ}C$				
		Расход тепла на установку	Q_{1x}	$Мккал/h$				По приложению 5-6 $Q_{1x} : N_{эx}$ $(860 : q_{1x}) \cdot 100$
		Удельный расход тепла на выработку электроэнергии	q_{1x}	$ккал/kвт \cdot h$				
		Абсолютный электрический к. п. д.	$\eta_{эx}$	%				

Примечания. 1. Последние строки «Установка при условиях характеристики» — только для установки без регулировки оборотов пара.
2. Величины без индекса «х» внизу относятся к условиям опытов.

Предельные отклонения основных величин от их средних значений за время опыта: максимум (+), минимум (—)

№ пп.	Наименование	● Норма	Номера опытов		
			1	2	3
1	Мощность, %	±5	+	—	
2	Давление свежего пара, %	±5	+	—	
3	Температура свежего пара, °С	±10	+	—	
4	Расход свежего пара, %	±5	+	—	
5	Давление в конденсаторе, %	±10	—	—	
6	Расход питательной воды, %	±5	+	—	
7	Расход пара из регулируемого отбора, %:				
8	I	±7	+	—	
	II	±7	+	—	
	Давление в камере регулируемого отбора и противодавления, %	±5	+	—	

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-2

Расход основного конденсата по диафрагме

Номер опыта	$p, \text{ атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{ кг/м}^3$	$h, \text{ мм}$	γh	$\sqrt{\gamma h}$	ε	k_t	$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	k	A	$G', \text{ м}^3/\text{ч}$	$G, \text{ м}^3/\text{ч}$	$G_B, \text{ м}^3/\text{ч}$	$G^P, \text{ м}^3/\text{ч}$	$\delta G^P, \%$
1																
2																
3																

Фактические данные для диафрагмы:

$$D = \text{--- мм}; \quad \alpha = \text{---};$$

$$d = \text{--- мм}; \quad k_T = \text{---}.$$

Расчетная формула

$$G' = A k_{\mu} \sqrt{\gamma h [m/\text{ч}]},$$

где

$$A = k k_{\mu} \varepsilon a d^2 \cdot 10^{-3}.$$

Окончательный расход

$$G = G' k_T,$$

$G_B = A \sqrt{\gamma_p h} = A_B \sqrt{h}$ — «видимый» расход по диафрагме при расчетной величине γ_p ;

G^P — показания расходомера, $\text{м}^3/\text{ч}$;

δG^P — отклонение показаний расходомера от показаний дифманометра в процентах по расходу

$$\delta G^P = \frac{G^P - G_B}{G_B} \cdot 100;$$

p, t — среднеарифметические действительные значения величин перед диафрагмой;

γ — для воды — по приложению III, для пара — по [Л. 24] или см. рис. 5-1;

k_T — поправочный множитель по результатам тарировки — см. приложение 3-12.

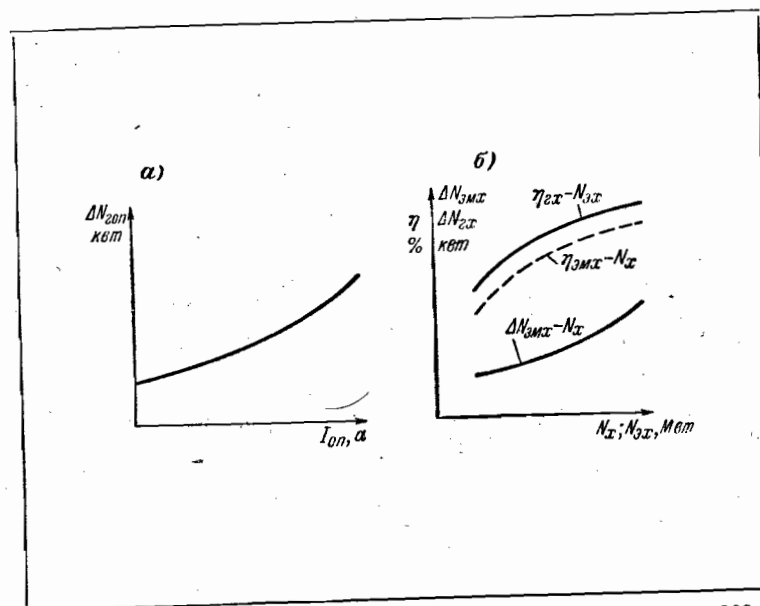
Значения $\alpha, k_t, k, \varepsilon, k_{\mu}$ определяются по Правилам 24-54 или по § 2-7.

Обычно

$$G > G_{\text{мин}} \text{ и } k_{\mu} = 1.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-3

Электромеханические потери и к. п. д. установки



Примечания:

1. При условиях опытов (см. § 5-2)

$$\Delta N_{\Gamma} = A + B \left(\frac{I_{\text{оп}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 [\text{квт}]. *$$

2. Рис. а построен по ряду произвольных значений

$$I_{\text{оп}} = 0,1; 0,2 \dots 1,0 I_{\text{н}}.$$

3. При условиях характеристики:

$$\Delta N_{\Gamma\text{Х}} = A + B \left(\frac{N_{\text{ЭХ}}}{N_{\text{ЭН}}} \right)^2 [\text{квт}].$$

$$\Delta N_{\text{ЭМХ}} = \Delta N_{\Gamma\text{Х}} + \Delta N_{\text{МХ}}; \Delta N_{\text{МХ}} - \text{см. § 5-2};$$

$$N_{\text{Х}} = N_{\text{ЭХ}} + \frac{\Delta N_{\text{ЭМХ}}}{1000} [\text{Мвт}];$$

$$\eta_{\Gamma\text{Х}} = \frac{N_{\text{ЭХ}} \cdot 1000 \cdot 100}{N_{\text{ЭХ}} + \Delta N_{\Gamma\text{Х}}} [\%];$$

$$\eta_{\text{ЭМХ}} = \frac{N_{\text{ЭХ}} \cdot 100}{N_{\text{Х}}} [\%].$$

4. Рис. б построен по ряду произвольных значений $N_{\text{ЭХ}} = 0,1; 0,2 \dots 1,0 N_{\text{ЭН}}.$

5. Индексом «н» отмечены номинальные значения величин:

$$N_{\text{ЭН}} = \text{---}; I_{\text{н}} = \text{---}.$$

6. Охлаждение генератора:

в условиях опытов _____

в условиях характеристики _____

* При отклонении напряжения от номинального не более $\pm 5\%$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-4

Расход пара на регенеративный подогрев конденсата
(тепловая схема по рис. 5-2)

№ пп.	Наименование	Обозначение величины	Элементы установки				
			П. №1	П. №2	Д. 1,2	П. №3	Д. 6,0
1	Номер опыта	—					
2	Расход пара на входе в проточную часть, $\text{м}^3/\text{ч}$	D_1					
3	Основной конденсат	Теплосодержание при входе, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
4		Теплосодержание при выходе, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
5		Повышение теплосодержания, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
6		Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$					
7		Сообщенное тепло, $10^3 \text{ ккал}/\text{ч}$					
8	Потери на излучение, $10^3 \text{ ккал}/\text{ч}$	$Q_{\text{п}}$					
9	Сообщенное тепло, $10^3 \text{ ккал}/\text{ч}$	$Q = Q_{\text{к}} + Q_{\text{п}}$					
10	Греющий конденсат (дренаж из последующего подогревателя)	Теплосодержание при входе, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
11		Теплосодержание при выходе, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
12		Понижение теплосодержания, $10^3 \text{ ккал}/\text{т}$					
13		Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$					
14		Отдаваемое тепло, $10^3 \text{ ккал}/\text{ч}$					

* См. п. 1 приложений 5-5 и 5-6. Для установок без регулируемых отборов пара и для ч. в. д. установки с регулируемым отборами (П. № 5) — расход свежего пара; для ч. с. д. и ч. н. д. (П. № 3 и П. № 1, 2) — на входе в эти части.

№ пп.	Наименование	Обозначение величины	Элементы установок				
			П. №1	П. №2	Д. 1.2	П. №3	Д. 6.0 П. №5
15	Греющий пар	Теплоотдающее пара, 10^3 ккал/м конденсата,					
16		10^3 ккал/м					
17		Тепло, отдаваемое 1 м, 10^3 ккал/м					
18		Все отдаваемое тепло, 10^3 ккал/ч					
19		Расход пара, т/ч					
20		из передних уплотнений **					
21		из отбора					

** Приведенные значения расхода пара из передних уплотнений в третий и пятый отборы D_{III} и D_{V} определяют по графикам зависимости этих величин от расхода свежего пара D_{I} оп при условиях опытов, для значений D_{I} оп = D_{IX} .

В случае турбины с двумя регулирующими отборами пара (ВПП-25) приведенные величины D_{II} и D_{V} определяют также из графиков, построенных по опытным величинам:

$$D_{II} \text{ оп} = f(D_{I} \text{ оп}) \quad \text{— для значений } D_{I} \text{ оп} = D_{2X}^{\text{ч.с.д.}},$$

$$D_{V} \text{ оп} = f(D_{2} \text{ оп}) \quad \text{— для значений } D_{2} \text{ оп} = D_{2X}^{\text{ч.с.д.}},$$

а расход D_{III} получают из выражения (см. § 5-3):

$$D_{III} = D_{II}^{\text{п}} - D_{V} \text{ оп}$$

Величину $D_{2X}^{\text{ч.с.д.}}$ находят методом последовательного приближения, сначала полагая $D_{III} = 0$, т. е. из выражения

$$D_{2X}^{\text{ч.с.д.}} = D_{IX}^{\text{ч.с.д.}} - D_{III},$$

где D_{III} — по п. 19 для подогревателя № 3.

Примечание. Расчет по данной форме составляют отдельно для условий опытов и для условий характеристики.

Внутренняя мощность и внутренний относительный к. п. д. проточной части в условиях опытов¹

20*

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов			Примечание
					1	2	3	
1	Расход пара: на входе в проточную часть через передние уплотнения из проточной части из камер отборов:	D_I	т/ч	Измерение ³				
2		$D_{II}^{\text{п}}$	»	Измерение ² ; ³ Из расчета по приложению 5-4				
3		D_{I0}	»					
4		D_2	...					
5	через передние уплотнения из камер отборов:	$N_{II}^{\text{п}}$	ккал/кг	$i_1 - i_{II}^{\text{п}}$ — измерение				
6		I_0	»	$i_1 - I_0$ — измерение ⁴				
7		N_{II2}	...	$i_1 - i_2$ — измерение ⁴				
8		$N_{II}^{\text{п}}$	квт	$D_{II}^{\text{п}} N_{II}^{\text{п}} / 0,860$				
9	из камер отборов:	N_{I0}	»	$D_{I0} I_0 / 0,860$				

¹ Для турбины с регулирующими отборами пара расчет по данной форме следует составлять отдельно для ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д.; у D_I , D_2 , N , N_2 , I_0 и N_{II} и N_{II2} и $N_{II}^{\text{п}}$ и N_{I0} должен быть сверху индекс ч. в. д., ч. с. д. или ч. н. д.; у всех величин внизу — индекс «оп» (пример: $D_{I \text{ оп}}^{\text{ч.в.д.}}$); для турбины без регулируемых отборов пара — все величин без индексов сверху и с индексом «оп» внизу (пример: $D_{I \text{ оп}}$).

307

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов			Примечание
					1	2	3	
10	сквозного потока	N_s	...	$D_s \bar{h}_{из} / 0,860^4$				
11	проточной части	N	...	$N_{упл}^п + N_{10}^п + \dots + N_s^п$, ⁴				
12	Внутренний относительный к. п. д. проточной части (диаграммный)	$\eta_{в02}$	%	$(h_{из} : h_{02}) \cdot 100$				
13	Внутренний относительный к. п. д. турбины	$\eta_{в0}$	%	$(860N : \Sigma D h_0) \cdot 100^5$				
14	Относительный электрический к. п. д. установок	η_{03}	%	$(860N_s : \Sigma D h_0) \cdot 100^5$				

² Только для ч. в. д. и для турбины без регулируемых отборов пара.

³ См. схему паровых потоков на рис. 5-4 (стр. 244); ΣD — сумма расходов пара между входом и выходом в проточной части.

⁴ При влажном паре на выходе и перегретом паре на входе в данной проточной части порядок расчета следующий:

а) $N = N_s + \Delta N_{эм} - \Sigma N$,
где $\Delta N_{эм}$ — по приложению 5-3;

ΣN — суммарная мощность всех частей турбины (ч. в. д. и ч. с. д.), кроме данной — для ч. н. д. турбины с регулируемым отбором пара;

б) $N_s = N - \Sigma N$,

где $\Sigma N = \Sigma D h_{из} / 0,860$ — суммарная мощность всех потоков пара кроме сквозного, в данной проточной части;

в) $h_{из} = \frac{D_s}{0,860N_s}$; $i_s = i_1 - h_{из}$;

г) $\eta_{в02} = \frac{h_{из}}{h_{02}}$ — для сквозного потока пара; h_{02} — по i — s диаграмме для p_1, t_1, p_2 .

⁵ Для турбины без регулируемых отборов пара.

Примечание к п. 3, 4, 6, 9. В опытах с отключенной регенерацией для расхода пара из передних уплотнений в отбор следует принять использованное теплопадение от камеры отбора до выхода (например $h_{из} - h_{из}^{1110}$); этот расход не включается в величину D_s .

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-6

Внутренняя мощность проточной части (расход пара и тепла и к. п. д. установок)

при условиях характеристики¹; 2; 6; 7

Условия: $p_{1х'} = \dots$ атм; $t_{1х'} = \dots$ °C; $i_{1х'} = \dots$ ккал/кг; $p_{2х'} = \dots$ атм

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов			Примечание
					1	2	3	
1	Расход пара:	D_1	т/ч	$D_{1оп} \frac{p_{1х'}}{p_{1оп}} \sqrt{\frac{T_{1оп}}{T_{1х'}}}^{3,7}$				
2	на входе в проточную часть							
3	через передние уплотнения из камеры регулирующей ступени	$D_{упл}^п$	»					
4	из камер отборов:	D_{10}	»	Из расчета по приложению 5-4				
5	сквозного потока — на выходе из проточной части	D_2	т/ч	Из весового баланса пара, стр. 244				
6	Использованное теплопадение потоков пара:	$h_{из}^п$ упл	ккал/кг	$h_{из}^п$ упл оп βh_0^5				
7	через передние уплотнения	$h_{из}^п$	»	$h_{из}^п \log h_0^6$				
8	из камер отборов:	$h_{из}^п$	ккал/кг	$h_{из}^п \log h_0^6$				
9	сквозного потока	$h_{из}^п$	ккал/кг	$h_{из}^п \log h_0^6$				

№ пп.	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов			Примечание
					1	2	3	
8	Внутренняя мощность потоков пара: через передние уплотнения . . .	$N_{упл}^п$	квт	$(\frac{D_{упл}^п}{N_{упл}^п} h_{упл}^п) : 0,860$				
9	из камер отборов: 1	$N_{10}^п$	»	$(\frac{D_{10}^п}{N_{10}^п} h_{10}^п) : 0,860$				
10	сквозного потока	$N_2^п$	квт	$(\frac{D_2^п}{N_2^п} h_{12}^п) : 0,860$				
11	проточной части	N	»	$N_{упл}^п + N_{10}^п + \dots + N_2^п$				
12	Внутренний относительный к. п. д. проточной части (диаграммный) . . .	$\eta_{воз}$	%	$h_{из} : h_{02}$				
13	Внутренний относительный к. п. д. турбины	$\eta_{во}$	%	$860N : \sum D h_0$				
14	Теплоудержание пара на выходе	ϵ_2	ккал/кг	$\epsilon_{1x}' - h_{из2}$				
	Показатели работы установки							
15	Электрохимические потери	$\Delta N_{эм}$	квт	По приложению 5-3				
16	Мощность на зажимах генератора	N_9	»	$N - \Delta N_{эм}$				
17	Расход свежего пара на установку . .	D_1	т/ч	См. стр. 244				
18	Теплоудержание питательной воды	$i_{пит}$	ккал/кг	По рис. 3, а приложения 3-8				
19	Расход тепла на установку	Q_1	Мккал/ч	$D_1 (i_1 + \Delta i_{оп} - i_{пит}) : 10^3$ при $G_{пит} = D_1$				
20	Удельный расход тепла на выработанный 1 квт.ч	q_1	ккал/квт.ч	$10^3 Q_1 : N_9$ $\frac{860 \cdot 100}{q_1}$				
21	Абсолютный электрический к. п. д.	$\eta_{э}$	%					

1 В скобках — для турбины без регулируемых отборов пара.

2 Для турбины с регулируемыми отборами пара расчет по данной форме следует составить отдельно для ч. в. д., ч. с. д. и ч. н. д. без пп. 15—21; у D_1 , D_2 , N , N_2 , $h_{из}$ и $\eta_{воз}$ должен быть верхний индекс ч. в. д., ч. с. д. или ч. н. д.; у всех величин внизу — индекс «х» (пример: D_{1x} , в. д.), что означает их отношение к условиям исходной характеристики данной проточной части; для турбины без регулируемых отборов пара все величины пп. 1—21 пишут без индексов сверху и с индексом «х» внизу (пример: D_{1x}).

3 Величины D_1 и N в опытах при полном и минимальном открытии парораспределения являются соответственно максимальными и минимальными при условиях характеристики.

4 Для ч. в. д. и для турбины без регулируемых отборов пара определяется по опытным данным — по графику $D_{упл\ op} = f(D_{1\ op})$ для D_1 по п. 1.

$\beta h_0 = h_{02\ op} : h_{02\ op}'$ по $i-s$ диаграмме для p_{1x} , i_{1x} и p_2 пр;
 $\beta h_{из} = \beta h_0 + \Delta h_{из\ op} : h_{из\ op}'$ $\Delta h_{из\ op} = 0,7 \div 0,8 (h_{02x} - h_{02\ op})$.

где

$$p_{2\ op} = p_{2\ op} \frac{D_2}{D_{2\ op}};$$

0,7 — для влажного пара на выходе;

0,8 — для перегретого пара на выходе.

Величины $h_{02\ op}$ и $h_{02\ op}'$ определяются с учетом влажности пара по рис. 5-6 или 5-8 и табл. 5-5; 5-6.

При наличии опытной поправки к мощности на изменение p_2

$$\Delta h_{из\ op} = \frac{0,860 \Delta N p_2}{D_2},$$

где

$$\Delta N p_2 = \Delta' N p_2 (p_{2x}' - p_2 \text{ пр});$$

$\Delta' N p_2$ — опытная поправка к мощности при повышении p_2 на 1 атм; $квт/атм$ — со знаком минус.

Для турбины с дроссельным парораспределением величина $h_{из\ op}$ и $h_{из\ op}'$ — 0.

5 В случае дроссельного парораспределения давление за дроссельным клапаном принимают равным опытному значению со следующими изменениями в расчете (см. стр. 286):

1. Расход пара на входе в проточную часть (п. 1)

$$D_{1x} = D_{1\ op} \sqrt{\frac{T_{др\ op}}{T_{др\ x}}},$$

где $T_{др\ x}$ — температура пара за дроссельным клапаном, соответствующая $p_{др\ x} = p_{др\ op}$ и $i_{др\ x} = i_{1x}$.

2. Располагаемое теплосодержание h_{02} и h_{02} пр соответствено индексам определяется от состояния пара за дроссельным клапаном до давления выхода (пп. 5-7):
 $P_{др оп} : i_{1 оп} ; P_{2 оп} и P_{др х} : i_{1 х} ; P_{2 х} ; P_{2 пр}$
 3. Для установки без конденсатора (типа П) и без регулирующих отборов пара вместо пп. 19—21 добавить следующие:
 19. Расход (опуск) тепла обработанным паром:
 $Q_2 = \Sigma D (i - i_k) : 10^3 [Мкал/ч]$,
 где i_k — теплосодержание возвращаемого конденсата при температуре насыщения отпусаемого пара, $ккал/кг$.
 20. Расход тепла на выработку электроэнергии: (см. стр. 95)
 $Q_3 = \frac{\eta_{эм} \cdot 10^3}{860 N_э} [Мкал/ч]$.

21. Удельная теплофикационная выработка электроэнергии с учетом регенеративных отборов пара:

$$\eta_p = \frac{N_э}{Q_2} [кат. ч/Мкал]$$

22. Относительный электрический к. п. д. установок:

$$\eta_{02} = \frac{\Sigma D h_0}{0,860 N_э} = \eta_{во} \eta_{эм}$$

При небалансе мощности по результатам измерений в опытах для установки типа П:

$$0,860 N_э : \eta_{эм} \neq \Sigma D h_{и}$$

приведенную внутреннюю мощность определяют по опытной (полагая ее более достоверной, чем величина $h_{и}$) путем пересчета ее пропорционально изменению расхода пара и теплосодержания (см. п. 7 приложения 5-5):

$$N = \frac{N_э оп}{N_э} \cdot \frac{(\Sigma D h)_{оп}}{\Sigma D h_{и}}$$

На этом основании (также в условиях опытов) определяют внутренний относительный к. п. д. турбины из выражения

$$\eta_{02} = \eta_{02} : \eta_{эм}$$

а $\Sigma D h_0$ — сумма произведений расхода на располагаемое теплосодержание всех потоков пара от состояния перед стопорным клапаном до давления их выхода из турбины.

При этом в зоне «естественного» повышения давления в камере отбора перед данной проточной частью (ч. с. д.; ч. н. д.) опытные величины приводят к ближайшим трем-четырем округленным значениям давления P_1 в пределах от $P_{1 макс}$ до $P_{1 макс}$ в данной камере отбора — см. P_2 в приложениях 5-7, п. 2, для ч. в. д. и ч. с. д.

Для ч. н. д. турбины с двумя отборами величину T_1 (или $T_{1х}$ в рассматриваемой зоне) не считают постоянной; ее определяют с учетом повышения теплосодержания i_1 , которое принимают равным:

$$i_1 = i_{1х} + 0,8 \Delta h_{02}$$

где Δh_{02} — по приложению 5-7, п. 8, для ч. с. д. при данном давлении P_1 ($P_{1х}$). Этим упрощается введение поправки на тепло-содержание (температуру) пара перед ч. н. д. в дальнейшем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-7

Поправка к мощности проточной части (ч. в. д.; ч. с. д.) на «естественное» повышение давления на выходе¹

У слов и я: $P_{1х} = \dots$; $i_{1х} = \dots$; $P_{2х} = 8 \text{ атм}$; $h_{02х} = \dots$; $P_{2 макс} = 13 \text{ атм}$,
 полное открытие парораспределения последующей проточной части (ч. с. д.; ч. н. д.)

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Значения величин
1	Расход пара на входе	D_1	$т/ч$	От $D_{1х}$ до $D_{1х макс}$ через 10 или 20 $т/ч$ ²	80 100
2	Давление на выходе	P_2	$атм$	3-6 значений от $P_{2х}$ до $P_{2 макс}$	8 ... 13 8
3	Расход пара на выходе при $P_{2х}$	$D_{2х}$	$т/ч$	По рис. 2, а приложения 3-8 для $D_{1х} = D_1$ по п. 1	
4	Давление в камере регенеративного отбора	P^0	$атм$	$\sqrt{[(P_x^0)^2 - (P_{2х}')^2] k_D^2 + P_2^0}$; P_x^0 по рис. 2, а приложения 3-8 для D_1 ³	
5	Повышение теплосодержания проточной воды при P^0 против $P_{2х}^0$	$\Delta i_{пт}$ (к)	$ккал/кг$		

¹ У всех величин сверху справа должен быть индекс проточной части (ч. в. д.; ч. с. д.; ч. н. д.); индексы 1; 2 у величин P, i, i можно заменить индексом отбора «п» или «т»». Расчет составляют для каждой части отдельно. Для ч. с. д. величина $\Delta D_{02} \leq 0,005 D_1$, т. е. ничтожна (см. п. 6).

² $D_{1х макс}$ и $D_{1х}$ — максимальный расход пара на входе в данную проточную часть (ч. в. д.; ч. с. д.) и предельный в следующую за ней (ч. с. д.; ч. н. д.) при $P_2 = P_{2х}$ (т. е. в начале «естественного» повышения давления P_2) по исходной характеристике соответствующей проточной части — рис. 2, а приложения 3-8. Влиянием P_2 на D_1 пренебрегаем.

³ $k_D = \frac{D_2}{D_{2х}} \approx 0,98 \div 1,0$ — отношение расходов пара через ступень, следующую за камерой регенеративного отбора (в данном случае на выходе) в соответствии с индексами.

⁴ Полагаем $\Delta i_{пт}$ равной $\Delta i_{нас}$ т. е. разности температур насыщения при P^0 и $P_{2х}^0$ или температурный напор неизменным.

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Значения величин
6	Увеличение отбора пара при p^0 против $p_{x'}$	$\Delta D^0_{p_2}$	т/ч	$D_1 \Delta i_{\text{пит}} : (i^0 - i^0_{\text{др}})_{\text{оп}}$	
7	Уменьшение расхода пара отбора при тепловом отборе пара при p^0 против $p_{x'}$	$\Delta h^0_{p_2}$	ккал/кг	$h^0_{0x'} - h^0_0$ по $i - s$ диаграмме от $p_{1x'}$; $t_{1x'}$	
8	Уменьшение расхода пара отбора при тепловом отборе пара при p^0 против $p_{x'}$	Δh_{02}	»	$h_{02x'} - h_{02}$ по $i - s$ диаграмме от $p_{1x'}$ до $t_{1x'}$	
9	Поправка к мощности на отклонение p_2 от $p_{2x'}$	ΔN_{p_2}	квт	$\left[D_{2x'} \Delta h_{02} + D^0_{x'} \Delta h_{0p_2} - \Delta D^0_{p_2} (h_{02x'} - h^0_{0x'}) \right] \frac{0,8}{0,860}$	
10	Теплосодержание пара на выходе	i_2	ккал/кг	$i_{2x'} + 0,8 \Delta h_{02}$	
11	Расход пара на выходе	D_2	т/ч	$D_{2x'} - \Delta D^0_{p_2}$	
12	Предельный расход пара на выходе в проточную часть, следующую за данной	D^c_1 пр	»	$D^c_{1x'} \frac{p_2}{p_{2x'}} \sqrt{\frac{T^c_{1x'}}{T^c_1}}$	

¹ При условии, что расход конденсата через подогреватель равен расходу пара D_1 на входе в данную проточную часть.

² Внутренний относительный к. п. д. ступеней для поправки на теплопадение принят равным 0,8; $\Delta h_{p_2} = 0,8 \Delta h_{02}$;

³ $D^0_{x'}$ — регенеративный отбор при $p_{2x'}$ по рис. 2, а приложения 3-8 для D_1 по п. 1.

⁴ T^c_1 определяется по p_2 и i_2 (пп. 2 и 10). Для ч. н. д., следующей после ч. с. д.: $T^c_1 \approx T^c_{1x'} + 2 \cdot 0,8 \Delta h_{02}$. Значения всех ве-

личин при D^c_1 пр по п. 12 больше D_1 по п. 1 не действительны. Величины в пп. 4—10 уточняют по опытным данным при режимах нагрузки с «естественным» повышением давления p_2 на выходе. При нескольких регенеративных отборах пара из данной проточной части для каждого из них определяют величины по пп. 4—8 и учитывают их в п. 9. На основании данных пп. 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13 строят графики рис. 5-9 для ч. в. д. и рис. 5-15 — для ч. с. д.

Продолжение приложения 5-7

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Значения величин
13	То же, на выходе из нее	D^c_2 пр	т/с	$D_{2x'}$ по рис. 2, а приложения 3-8 для $D_{1x'}$ = $= D^c_1$ пр	
14	Теплофикационный отбор пара	D_T		$D_2 - D^c_1$ пр	

¹ Пункт 14 — только для ч. с. д.; в пп. 12 и 13 следует помещать D^c_1 пр ф. D^c_2 пр ф. и D^c_1 пр ф. — соответствующие фактивные расходы пара в ч. н. д.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-8

Расчет к диаграммам режимов по расходу пара и тепла

для установок с двумя регулирующими отборами пара (типа ВПТ-25)

Условия характеристики: $p_{1x} = 90 \text{ атм}$; $t_{1x} = 500^\circ \text{C}$; $p_{1x} = 10 \div 13 \text{ атм}$; $p_{1x} = 1,2 \text{ атм}$; $G_{\text{пит}} = D_1$; $D_T = 0$; тепловая схема, температура конденсата и к. п. д. генератора — по приложениям

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Значения величин
Расчет к диаграмме режимов по расходу пара					
Режим нагрузки					
1	Расход свежего пара	D_1	т/ч	От минимума до максимума по рис. А через 20 т/ч^1	60

¹ Рис. А означает условное сокращенное название исходной характеристики соответствующей проточной части (ч. в. д., ч. с. д. или ч. н. д.) по рис. 2, а приложения 3-8.

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Форма, способ определения	Значения величин
2	Расход пара на выходе из ч. с. д.	$D_2^{ч.с.д.}$	т/ч	От минимума до максимума по рис. А через $10 \text{ м}^3/\text{ч}^1$	20 30 40 20
3	Расход пара на входе	$D_1^{ч.в.д.}$		По D_1 — см. рис. 5-4	
4	» » выходе	$D_2^{ч.в.д.}$	»	$D_2^{ч.в.д.} = \Delta D_{p_п}^{10}$; по рис. А для $D_1^{ч.в.д.}$ и рис. 5-9 ¹	
5	Внутренняя мощность по характеристике ч. в. д.	$N_x^{ч.в.д.}$	квт	По рис. А для $D_{1x}^{ч.в.д.} = D_1^{ч.в.д.}$	
6	Поправка к мощности на естественное повышение давления $p_п$	$\Delta N_{p_п}^{ч.в.д.}$	»	По рис. 5-9 (со знаком минус)	
7	Внутренняя мощность	$N^{ч.в.д.}$	»	$N_x^{ч.в.д.} + \Delta N_{p_п}^{ч.в.д.}$	
8	Теплосодержание пара на выходе	$i_п$	ккал/кг	По рис. 5-9 с учетом $p_п$	

¹ Рис. А означает условное сокращенное название исходной характеристики соответствующей протоиной части (ч. в. д., ч. с. д. или ч. н. д.) по рис. 2, а приложения 3-8.

» При $p_п = p_{пх}$ величина $D_2^{ч.с.д.} = D_{2x}^{ч.с.д.} \sqrt{\frac{T_п}{T_{пх}}}$, где $T_п$ — по п. 8 (см. ниже); практически влиянием $T_п$ можно пренебречь. Значение $D_2^{ч.с.д.}$ — по рис. 5-9 для $p_п$ макс, но не более $D_2^{ч.в.д.}$ — по п. 4 (см. ниже).

Для установки с одним регулируемым отбором пара: принять $D_{1ф}^{ч.н.д.}$ вместо $D_2^{ч.н.д.}$, пп. 10—16, 32 исключить; пп. 19, 20, 28, 29 — для $D_1^{ч.н.д.}$ и $Q_1^{ч.н.д.}$; п. 13 — для ч. н. д.

Продолжение приложения 5-8

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Форма, способ определения	Значения величин
9	Удельный приrost теплофикационной выработки электроэнергии паром отбора после ч. в. д. (1 т пара, выходящего из ч. в. д.)	$y_{рп}$	$\frac{\text{квт} \cdot \text{ч}}{\text{Мккал}}$	$\Delta 10^3 N^{ч.в.д.} \eta_{эм} : \Delta [D_2^{ч.в.д.} (i_п - i_{п \text{ нас}})]^1$	
10	Расход пара на входе	$D_1^{ч.с.д.}$	т/ч	По рис. А для $D_{2x}^{ч.с.д.} = D_2^{ч.с.д.} - \Delta D_{упл}$	
11	Внутренняя мощность по характеристике ч. с. д.	$N_x^{ч.с.д.}$	квт	По рис. А для $D_{1x}^{ч.с.д.} = D_1^{ч.с.д.}$	
12	Поправка к мощности на отсос пара из уплотнений в камеру третьего отбора	$\Delta N_{ч.с.д. \text{ упл}}$	»	$\Delta D_{1110}^{ч.с.д.} \frac{1}{h_{2x}} \frac{1}{h_{1110}} \frac{1}{0.9} \frac{1}{0.860}$	

¹ Знак Δ означает разность между значениями числителя и знаменателя для данной и предыдущей графы таблицы. График зависимости $y_{рп} = f(Q_1)$ — см. приложение 5-11, графики XVI.

Удельный приrost теплофикационной выработки электроэнергии паром отбора после ч. с. д. $y_{тр} = f(Q_1)$ — см. приложение 5-11, графики XVI, получают как отношение приростов $\Delta N_{вс} : \Delta Q_1$ на последовательных участках графиков $N_{вс} = f(D_2^{ч.с.д.} (i_п - i_{тк}))$, построенных для ряда округленных значений $Q_п = \text{const}$ с помощью переходных графиков (см. стр. 279) $N_9 = f(Q_1)$ для всех значений $D_2^{ч.с.д.} = \text{const}$. Эти графики строят по величинам в пп. 2, 15, 16 и 20. Без учета регенеративных отборов

где $i_п$ (т) нас — теплосодержание возвращаемого конденсата при температуре насыщения пара отбора (см. стр. 293); $\eta_{эм} = \frac{e_{тр}}{e_{теор}}$ — коэффициент полезного действия турбины; $e_{тр} = \frac{1}{860} (i_п - i_{п \text{ нас}}) \eta_{эм} \cdot 10^6$;

» ΔD_{1110} — см. стр. 280

» Мощность потока пара из уплотнений от камеры третьего отбора до выхода из ч. с. д. Множитель $1 \div 0.9$ учитывает наличие отсуебора из ч. с. д. для нагрева конденсата дополнительного отсоса пара ΔD_{111} при $D_1^{ч.с.д.} = 0 \div D_1^{ч.с.д. \text{ макс}}$

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формы, способ определения	Значения величин
13	Поправка к мощности на теплосодержание пара перед ч. с. д.	$\Delta N_{\text{т}}^{\text{ч. с. д.}}$	квт	$N_{\text{х}}^{\text{ч. с. д.}} \Delta N_{\text{т}}^{\text{ч. с. д.}}$	
14	Внутренняя мощность	$N^{\text{ч. с. д.}}$	»	$N_{\text{х}}^{\text{ч. с. д.}} + \Delta N_{\text{упл}}^{\text{ч. с. д.}} + \Delta N_{\text{т}}^{\text{ч. с. д.}}$	
15	Теплосодержание пара на выходе	$i_{\text{т}}$	ккал/кг	$i_{\text{п}} - h_{\text{н2}}^{\text{ч. с. д.}} (1 + \delta N_{\text{т}}^{\text{ч. с. д.}}); h_{\text{н2}}^{\text{ч. с. д.}}$ по рис. 5-9 для $p_{\text{т}} = p_{\text{тх}}$	
16	Мощность ч. в. д. и ч. с. д.	$N_{\text{э}}^{\text{вс}}$	квт	$(N^{\text{ч. в. д.}} + N^{\text{ч. с. д.}}) \eta_{\text{эм}}^2$	
17	Внутренняя мощность по характеристике ч. и. д.	$N_{\text{х}}^{\text{ч. и. д.}}$	квт	По рис. А для $D_{1\phi}^{\text{ч. и. д.}} = D_2^{\text{ч. с. д.}}$ (при $D_{\text{т}} = 0$) ^а	

^а $\delta N_{\text{т}}^{\text{ч. с. д.}}$ — по рис. 5-6 на отклонение $i_{\text{п}}$ от $i_{\text{пх}}$, по рис. А (см. прим. 1) для $D_{1\text{х}}^{\text{ч. в. д.}} = D_1^{\text{ч. в. д.}}$, влиянием отклонения $i_{\text{п}}$ от $i_{\text{пх}}$ на открытие парораспределения и к. п. д. $\eta_{\text{во}}$ ч. с. д. при данном значении $D_1^{\text{ч. с. д.}}$ пренебрегаем.

^б См. сноску 1 на стр. 317.

^в Рис. А означает условное сокращенное название исходной характеристики соответствующей проточной части (ч. в. д., ч. с. д. или ч. и. д.) по рис. 2, а приложения 3-8.

Продолжение приложения 5-8

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формы, способ определения	Значения величин
18	Отбор пара после ч. в. д.	$D_{\text{дб}}$	т/ч	По приложению 5-4 ¹	
19	Расход пара на деаэратор 6 ата	$D_{\text{п}}$	»	$D_2^{\text{ч. в. д.}} - D_1^{\text{ч. с. д.}} - D_{\text{дб}}$	
20	Промышленный расход пара	$Q_{\text{п}}$	Мккал/ч	$D_{\text{п}} (i_{\text{п}} - i_{\text{к2}}^{\text{дб}})$	
21	» отпуск тепла				
22	Установка				
23	Внутренняя мощность	N	квт	$N^{\text{ч. в. д.}} + N^{\text{ч. с. д.}} + N^{\text{ч. и. д.}}$	
24	Электромеханические потери	$\Delta N_{\text{эм}}$	»	По приложению 5-3	
25	Мощность на зажимах генератора	$N_{\text{э}}$	»	$N - \Delta N_{\text{эм}}$	
26	Теплосодержание питательной воды	$i_{\text{пит}}$	ккал/кг	С учетом $p_{\text{п}}$ по рис. 5-9	
27	Расход тепла на установку	Q_1	Мккал/ч	$D_1 (i_1 + \Delta i_{\text{пит}} - i_{\text{пит}})^{\text{в}}$	
28	» » выработку				
29	электроэнергии	$Q_{\text{э}}$	»	$Q_1 - Q_{\text{п}}$	

¹ Расход пара на деаэратор 6 ата $D_{\text{дб}}$ определяют с помощью двух графиков

1) $D_{\text{дб}} = f(D_2^{\text{ч. с. д.}} \text{ или } D_1^{\text{ч. и. д.}})$, получаемого для условий характеристики без учета тепла дренажа из ПВД, поступающего в деаэратор (см. стр. 237, приложение 5-4).

2) $\Delta D_{\text{дб}} = f(D_1)$ — часть расхода пара отбора на деаэратор, вытесняемая выпаром дренажа из ПВД. Таким образом, $D_{\text{дб}} = D_{\text{дб}}^1 - \Delta D_{\text{дб}}$.

Оба графика можно совместить на диаграмме $D_{\text{дб}} = f(D_1; D_2^{\text{ч. с. д.}} \text{ или } D_1^{\text{ч. и. д.}})$.

^в $\Delta i_{\text{пит}}$ — повышение теплосодержания питательной воды в питательном насосе (см. стр. 257).

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Форма, способ определения	Значения величин
27	Удельный расход тепла на выработку электроэнергии	q_9	ккал/квт·ч	$Q_9 : N_9$	
Расчет к диаграмме режимов по расходу тепла					
28	Промышленный отпуск тепла	$Q'_п$	Мккал/ч	От нуля до максимума через 10 Мккал/ч для каждого значения D_1 по п. 1	0 10 0
29	» расход пара	$D'_п$	т/ч	По рис. 5-14 для D_1 и $Q'_п$ по пп. 1 и 29	
30	Расход тепла на установку	Q'_1	Мккал/ч	По рис. 5-14 для D_1 и $D'_п$	
31	Мощность на зажимах генератора	N'_9	квт	По рис. 5-12 для D_1 и $D'_п$	
32	Поправка на спрямление линий $\Delta N = f(Q_T)$ в нижней части диаграммы	$\Delta' N_{IT}$	$\frac{\text{квт}}{\text{Мккал/ч}}$	$[B_T (t'_T - t_{Tx}') : (t'_T - t_{Tx} \text{ нас})] \cdot 10^3$	

B_T — угловой коэффициент линий $\Delta N_9 = f(Q_T)$ в нижней части диаграммы режимов по расходу тепла:

$$B_T = \frac{B \cdot 10^3}{t_{Tx}' - t_{Tx} \text{ нас}} \quad [Мет/Мккал/ч],$$

где B — угловой коэффициент линий $\Delta N_9 = f(D_T)$ в нижней части диаграммы режимов по расходу пара (см. § 5-5):

$$B = \frac{1}{a_{\Phi} \cdot n \cdot d} \left(\frac{\partial N_T}{1 - \frac{\partial N_T}{100}} - \Delta N_{T, \text{упл}}^{\text{н. д.}} \right) [т/Мет];$$

здесь a_{Φ} и $n \cdot d$ [т/Мет] — по рис. А, см. прим. п. 1.

Поправка к мощности установки в квт:

$$\Delta N_{IT} = \Delta' N_{IT} Q_T$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5-9

Сравнение с гарантиями приведенного опытного расхода свежего пара

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Значения величин
Гарантийные режимы нагрузки					
1	Мощность на зажимах генератора	N_9	квт	Гарантии, по техническим условиям завода	
2	Расход пара из отборов: при $p_{\Pi} = 10 \text{ ата}$	D_{Π}	т/ч	То же	
	» $p_T = 1,2$ »	D_T	»	»	
Гарантийные данные					
3	Расход свежего пара	$D_{1г}$	т/ч	»	
4	К. п. д. генератора	$\eta_{гг}$	%	»	
5	Теплосодержание питательной воды	$i_{\text{пит г}}$	ккал/кг	»	
6	Давление в конденсаторе	$p_{гг}$	ата	»	
Опытный расход свежего пара, приведенный к гарантийным условиям					
7	Расход свежего пара по характеристике при гарантийных режимах нагрузки	D_{1x}	т/ч	Приложение... (диаграмма режимов)	
8	Поправка на отклонение давления p_{Π}	$\Delta D_{p_{\Pi}}$	»	Поправочные кривые к характеристике	
9	» » » p_T	ΔD_{p_T}	»	То же	
10	» » » к. п. д. генератора	$\Delta D_{\eta_{гг}}$	»	»	
11	» » » теплосодержания $i_{\text{пит}}$	$\Delta D_{i_{\text{пит}}}$	»	»	
12	» » » давления p_2	ΔD_{p_2}	»	»	
13	Суммарная поправка	$\Sigma \Delta D_i$	»	»	
14	Расход свежего пара по характеристике, приведенный к гарантийным условиям	D'_{1x}	»	$D_{1x} + \Sigma \Delta D_i$	
15	Отклонение приведенного опытного расхода свежего пара от гарантийного	δD_1	%	$(D'_{1x} : D_{1г} - 1) \cdot 100$	

ОТЧЕТ

об испытании паротурбинной установки типа _____ ст. № _____
на ТЭС _____

_____ 19 ____ г.

Исполнители:

Руководитель испытания _____

АННОТАЦИЯ

Отчет содержит результаты теплового испытания паротурбинной установки типа _____ ст. № _____ на ТЭС _____

В результате испытания составлены тепловые характеристики установки по расходу пара и тепла и ее основных элементов: парораспределения, проточной части, регенеративных подогревателей, конденсатора и тепловой схемы, а также характеристики регулирования и насосов: циркуляционного, конденсатного и сливного. Даны рекомендации по улучшению работы установки.

Для гарантийных режимов нагрузки и условий работы получен удельный расход тепла (пара) *выше (ниже)* гарантий на _____ %, при допуске к гарантиям _____ %; следовательно, гарантии *(не)* выдерживаются.

Часовые расходы пара и тепла при условиях характеристики (в основном совпадающих с гарантийными условиями) имеют следующие аналитические выражения:

$$D_1 = \text{_____} [m^3/ч];$$

$$Q_1 = \text{_____} [Mkкал/ч].$$

Относительный электрический к. п. д. установки (типа П) *выше (ниже)* гарантий на _____ %.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Цель испытания	Стр.
II. Краткая техническая характеристика установки	
III. Объем, условия и режим испытания	
IV. Методы измерений и подсчетов	
V. Результаты испытания	
VI. Выводы	
VII. Предложения	
Приложения:	

1. _____

Обозначения (см. стр. 7—8).

I. Цель испытания

Данный раздел излагается по приложению 3-1 (раздел I).

Условия характеристики приведены на стр. _____

Замечания по разделу I: испытание проведено в связи _____

II. Краткая техническая характеристика установки

Краткая техническая характеристика установки по заводским данным и по состоянию во время испытания представляется следующими данными (все данные взять из приложения 3-7).

Замечания по разделу II: _____

III. Объем, условия и режим испытания

Тепловое испытание установки состояло из опытов при режимах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

№ пп.	Наименование	Режим работы		
		I	II	III
1	Номера опытов	1—8		
2	Электрическая нагрузка, <i>Мвт</i>	30—6		
3	Расход свежего пара, <i>т/ч</i>	200—40		
4	Расход пара из регулируемых отборов, <i>т/ч</i> :			
	I	115—0		
	II	55—0		
5	Давление в камере регулируемых отборов, <i>атм</i> :			
	I	8		
	II	1,2		
6	Давление выхлопа, <i>атм</i>	0,05—0,052		
7	Номера включенных подогревателей	1, 2, 3, 5		

Испытательная тепловая схема приведена в приложении № _____

Кроме того, проведены четыре опыта при холостом ходе, в том числе три для снятия статической характеристики регулирования, а также два опыта со сбросом нагрузки 20 и 30 *Мвт* при работе турбины без регулируемых отборов пара и два опыта по сбросам 20 и 30 *Мвт* при включенных регулируемых отборах.

Были проведены также испытания циркуляционного, конденсатного и сливного насосов, серия опытов по определению экономического вакуума при одной температуре охлаждающей воды и серия опытов по определению поправки к мощности на давление выхлопа (на вакуум в конденсаторе).

Условия проведения теплового испытания: _____

(из программы испытания — приложения 3-1, раздел 4).

Замечания по разделу III: _____

Во время опытов наблюдались следующие отклонения от условий проведения испытания, предусмотренных программой: _____

IV. Методы измерений и подсчетов

Методы измерений и подсчетов величин соответствуют _____ и указаны в последней графе сводной таблицы результатов испытаний приложения 5-1, а также в других приложениях.

Мощность генератора измерялась _____ и контролировалась _____

Расход свежего пара, конденсата питательной воды и пара из регулируемых отборов измерялся _____

Диафрагма на линии конденсата, установленная _____ тарировалась по мерному баку, а диафрагма (сопло) на линии свежего пара — по диафрагме на линии конденсата в опытах с отключенными отборами пара (см. приложения № ____). Значения тарифовочных множителей к расчетным коэффициентам расхода пара и конденсата составляют _____ и приняты _____

Сводка балансов пара и конденсата в опытах приведена в табл. 2 (в зависимости от схемы измерений).

Таблица 2

Наименование величины	Номер опыта	
	1	2
Расход свежего пара, $m^3/ч$		
» основного конденсата, $m^3/ч$		
» пара регулируемых отборов, $m^3/ч$		
Суммарный расход регенеративных отборов пара (не включенных в основной конденсат), $m^3/ч$		
Сумма расходов конденсата и отборов пара, $m^3/ч$		
Разность между расходом свежего пара и суммой расходов конденсата и отборов пара — небаланс:		
$m^3/ч$		
%		

Расхождение между основными и контрольными измерениями мощности в опытах было в пределах $\pm$ ____%.

В отдельных опытах (№ ____) отклонения достигли ____%.

Замечания по разделу IV _____

V. Результаты испытания

Опытные значения всех величин помещены в таблице-приложении № ____.

Графики тепловых характеристик установки см. в приложениях № ____.

В приложениях № ____ приведены результаты испытания и характеристика регулирования, циркуляционного, конденсатного и сливного насосов, график экономического вакуума при температуре охлаждающей воды ____°С, а также вспомогательные графики и расчеты.

1. Условия тепловой характеристики установки

Тепловые характеристики составлены для следующих условий работы установки (из программы испытания — приложения 3-1, раздела 1).

Замечания по п. 1: условия характеристики отличаются от гарантийных следующим образом: _____

2. Пределы мощности и расхода пара

Наименование величины	Опытные данные в условиях		Гарантия (проект)
	характеристики	гарантий	
1. Мощность на валах генератора, $квт$:			
максимальная			
экономическая			
минимальная			
2. Расход пара, $m^3/ч$:			
максимальный:			
через ч. в. д.			
» ч. с. д.			
» ч. н. д.			
регулируемых отборов:			
II			
минимальный:			
через ч. с. д.			
» ч. н. д.			

Причины ограничения мощности и расходов пара _____

3. Заключение по п. 2: _____

3. Тепловая характеристика установки

а) расход свежего пара, $m^3/ч$:

$$D_{1x} = \text{_____};$$

б) расход тепла на установку, $Мккал/ч$:

$$Q_{1x} = \text{_____};$$

в) удельная теплофикационная выработка электроэнергии паром регулируемых отборов в зависимости от расхода свежего пара D_{1x} приведена в табл. 3, где обозначено:

y — без учета выработки регенеративных отборов пара, связанных с нагревом возврата конденсата (определяемая по инструкции МЭС);

y_p — с учетом указанной выработки (что более правильно).

Таблица 3

№ пп.	Обозначение величины	Значение величины		
1	D_{1x} , $m^3/ч$			
2	y_p , $квт \cdot ч/Мккал$			
3	y_{rp} »			
4	y_T »			
5	y_{pt} »			

г) удельный расход пара и тепла по сравнению с гарантиями (с данными _____) при гарантийных режимах и условиях работы приведен в табл. 4.

Таблица 4

№ пп.	Наименование величины	Режим нагрузки	
		I	II
	Гарантии		
1	Мощность на зажимах генератора, Мвт		
2	Расход пара из отборов, т/ч: при $p_{II} = \dots$ атм		
	» $p_{II} = \dots$ «		
3	Удельный расход свежего пара, кг/квт.ч		
4	» » тепла, ккал/квт.ч		
	<i>Опытные данные, приведенные к гарантийным условиям</i>		
5	Удельный расход свежего пара, кг/квт.ч		
6	» » тепла, ккал/квт.ч		
	<i>Отклонение приведенных опытных данных от гарантий</i>		
7	Отклонение удельного расхода пара, %		
8	» » тепла, %		
9	Среднее отклонение расхода тепла, %		
10	Допуск завода к гарантиям, %		

Графики (диаграммы режимов) расхода пара и тепла см. в приложениях № _____

З а к л ю ч е н и е п о п. 3: _____

4. Проточная часть

Внутренний относительный к. п. д. проточной части, давление по ступеням и расход пара на концевые уплотнения вала турбины при максимальных расходах пара через проточную часть и давлении на выходе по условиям характеристики приведены в табл. 5 по сравнению с проектными () данными.

Таблица 5

Наименование величины	Испы- тание	Проект	...
Внутренний относительный к. п. д. — диаграмм- ный (для сквозных потоков пара), %:			
ч. в. д.			
ч. с. д.			
ч. н. д.			
всей проточной части			
Общий к. п. д. турбины, %			
Относительный электрический к. п. д. установки, %			
Давление в камерах, атм:			
регулирующей ступени ч. в. д.			
I отбора			
регулирующей ступени ч. с. д.			
III отбора			
регулирующей ступени ч. н. д.			
V отбора			
Расход пара, отсасываемого из передних уплотне- ний, т/ч:			
в камеру III отбора			
» » V »			
Расход пара на парохладитель уплотнений, т/ч			

Графические характеристики проточной части см. в приложе-
нии № _____

З а к л ю ч е н и е п о п. 4: _____

5. Парораспределение

Падение давления в клапанах ч. в. д. при полном их открытии $\Delta'p$ и в момент открытия очередного клапана $\Delta''p$ (включая сопротивление подводов от стопорного клапана), падение давления в стопорном клапане при полном расходе свежего пара (т/ч) — см. в табл. 6.

Таблица 6

Обозначение величины	Клапан							
	I		IV		стопорный			
	испы- тание	проект	испы- тание	проект	испы- тание	проект	испы- тание	проект
$\Delta'p$, атм . .								
$\Delta''p$, атм . .								

Графическую характеристику парораспределения см. в прило-
жении № _____

З а к л ю ч е н и е п о п. 5: _____

6. Регенеративные подогреватели

Основные показатели экономичности работы подогревателей при их полной нагрузке помещены в табл. 7.

Таблица 7

№ пп.	Наименование величины	Подогреватели			
		№ 1		№ 2	
		испы- тание	проект	испы- тание	проект
1	Падение давления в паропроводе от- бора: атм				
2	Температурный напор, °С				
3	Температура воды на выходе, °С				
4	Переохлаждение дренажа, °С				
	Гидравлическое сопротивление, атм				

Графики температуры конденсата и питательной воды за подо-
гревателями см. в приложении № _____

З а к л ю ч е н и е п о п. 6: _____

7. Конденсатор

Показатели экономичности работы конденсационной установки при полной паровой нагрузке — т/ч или $\text{кг/м}^2\cdot\text{ч}$ приведены в табл. 8.

Таблица 8

№ пп.	Наименование величины	Испытание	Проект (норма)
<i>Условия</i>			
1	Температура охлаждающей воды на входе, °С		
2	Расход охлаждающей воды, $\text{м}^3/\text{ч}$		
3	Расход воздуха, отсасываемого эжектором, кг/ч		
4	Давление пара перед соплами эжектора, ата		
<i>Показатели</i>			
5	Давление в конденсаторе, ата		
6	Температурный напор, °С		
7	Переохлаждение конденсата, °С		
8	Жесткость конденсата по химическому анализу, мкг-экв/л		
	или присос сырой воды, %		
9	Содержание кислорода в конденсате, мг/л		
10	Расход пара на эжектор, т/ч		

Графики давления и температурного напора в конденсаторе см. в приложении № — .

Заключение по п. 7:

8. Использование регулируемых отборов пара

Давление и расход пара из камер регулируемых отборов характеризуются величинами, приведенными в табл. 9.

Таблица 9

№ пп.	Наименование величины	Отборы	
		I	II
1	Максимальный расход, т/ч : по гарантиям (проект) в условиях эксплуатации		
2	Фактический средний расход за год, т/ч		
3	Давление в камере отбора, ата : по гарантиям (проект) в условиях эксплуатации		
4	Давление, необходимое потребителям, ата		
5	Падение давления в трубопроводах: от камеры отбора до коллектора: ата % от коллектора до потребителя: ата %		

Заключение по п. 8:

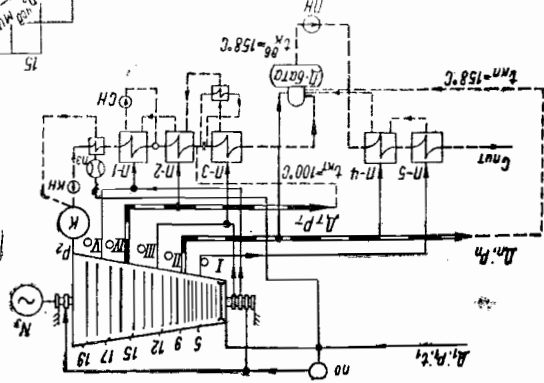
ДИАГРАММА РЕЖИМОВ ПО РАСХОДУ ПАРА ДЛЯ ТУРБИНЫ ТИПА ВПТ-25-3

Условия:

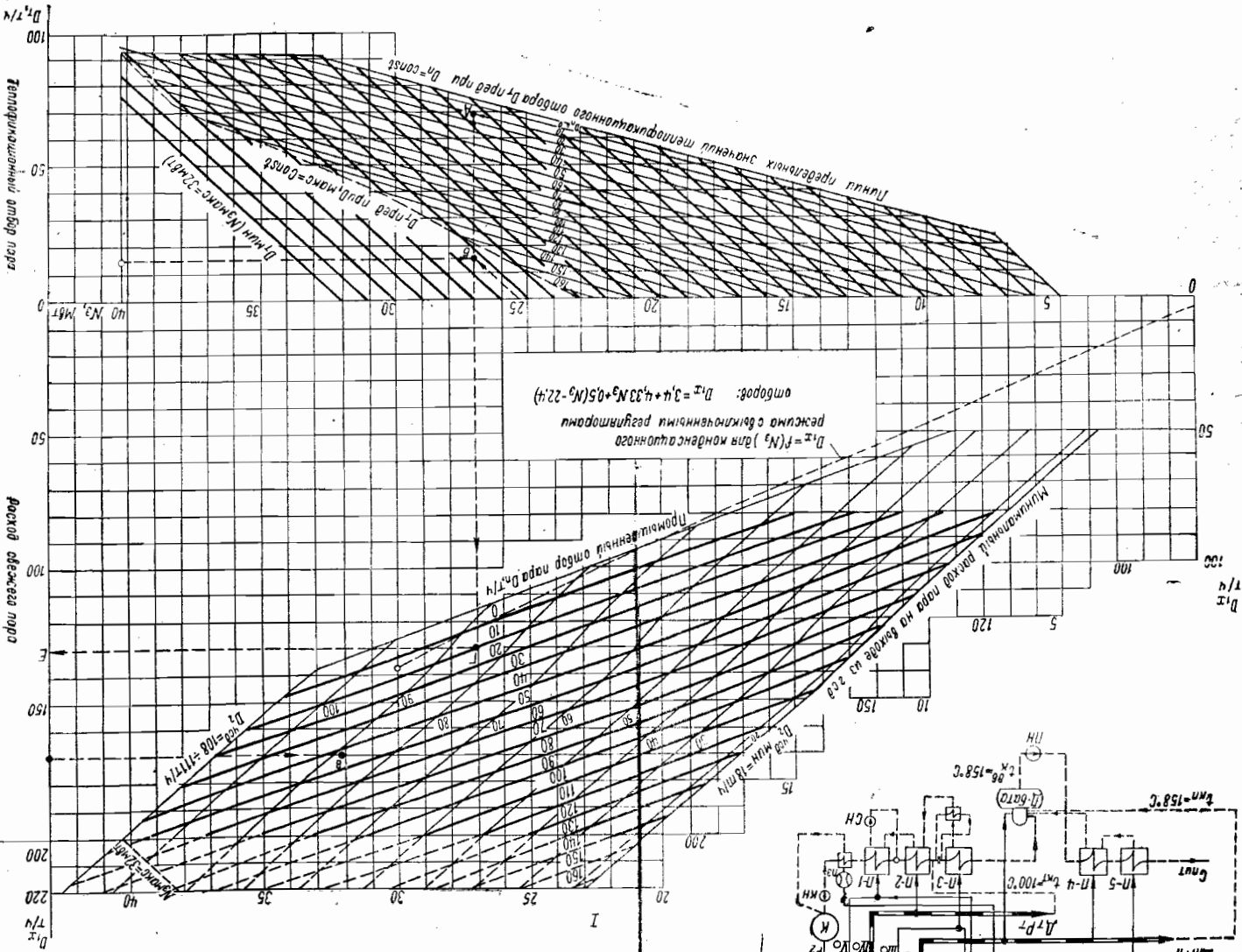
1. $p_{1x} = 90 \text{ атм}$; $t_{1x} = 500^\circ \text{С}$; $p_{2x} = p_{\text{ман}} = 13 \text{ атм}$; $p_{3x} = 1,2 \text{ атм}$; $p_{4x} = 0,05 \text{ атм}$; $G_{\text{гит}x} = D_{1x}$ — по графику VI.

3. Поправки по графикам II.

2. Тепловая схема:



по техническим условиям завода — условно



1. Расход свежего пара: $D_{1x} = 17 + 3,66 (N_3 - \Delta N_3) + 0,7 D_n + 0,4 D_{1r}$ где $\Delta N_3 = \Delta N_{3, \text{н.к.}} + \Delta N_{3, \text{ч.с.}} + \Delta N_{3, \text{р.т.}}$ где $\Delta N_{3, \text{н.к.}}$ — по графикам II.

2. Зона повышенного давления пара теплофикационного отбора: $D_{2, \text{с.д.}} - D_{1r} > 62 \text{ м/ч}$ — см. график V.

3. Предельный теплофикационный отбор пара: $D_{1r} = D_{2, \text{с.д.}}$ или по нижней диаграмме в точке A пересечения линии $D_n = \text{const}$ с вертикалью, проходящей через точку B пересечения линии $D_{1r} = \text{const}$ и $N_3 = \text{const}$ для заданных значений D_n , D_{1r} и N_3 .

Примечания.

1. При температуре возвращаемого конденсата пара промышленного отбора $t_{\text{кп}} < 158^\circ \text{С}$ на диаграмме следует откладывать значения $t_{\text{кп}} = 158^\circ \text{С}$.

2. $D_n = D_{\text{нрп}} - t_{\text{н}} - t_{\text{кп}}$

где $D_{\text{нрп}}$ — расход пара к потребителю, м/ч; $t_{\text{н}}$ — температурное падение пара отбора по графику IV.

2. Поправки на отклонение параметров от условий характеристики — см. графики VII—XII.

Расход свежего пара с учетом этих поправок определяется по диаграмме режимов или по формуле для заданных значений D_n , D_{1r} и для $N_3 = \Delta N_3 + \Delta N_{3, \text{н.к.}}$ где N_3 — заданное значение мощности, Мвт; $\Delta N_{3, \text{н.к.}}$ — сумма поправок по графикам VII—XII, Мвт.

Пример пользования диаграммой режимов по расходу пара

Дано:

$N_3 = 25,3 \text{ Мвт}$;
 $D_n = 20 \text{ м/ч}$;
 $D_{1r} = 15 \text{ м/ч}$.

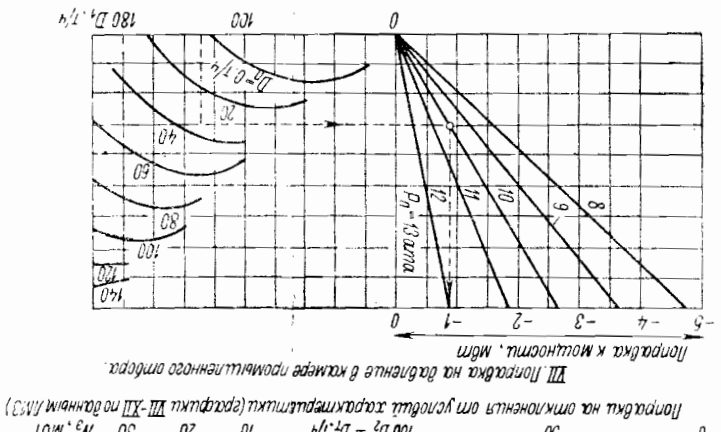
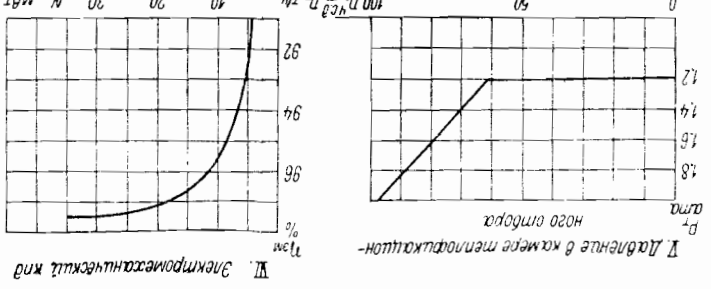
Определяем:

1. Режим возможен, так как он находится в границах диаграммы режимов и $D_{1r} > D_{1r, \text{пред}}$ (по нижней диаграмме в точке A и по верхней — в точке I величина $D_{1r, \text{пред}} = 68 \text{ м/ч}$).

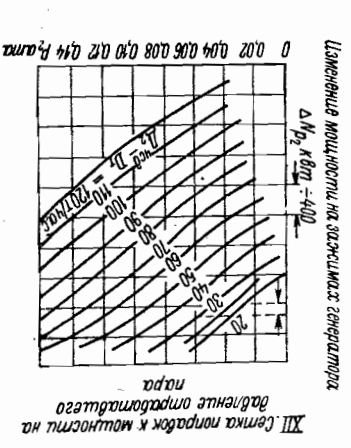
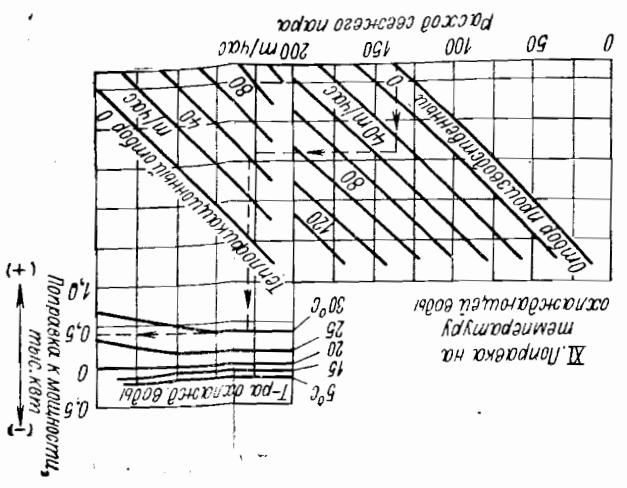
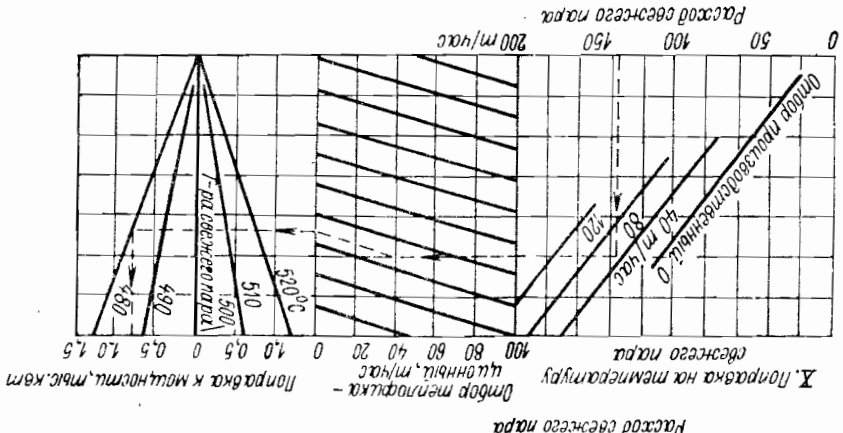
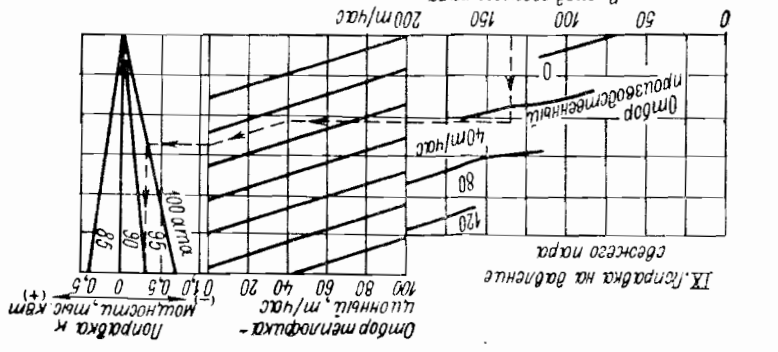
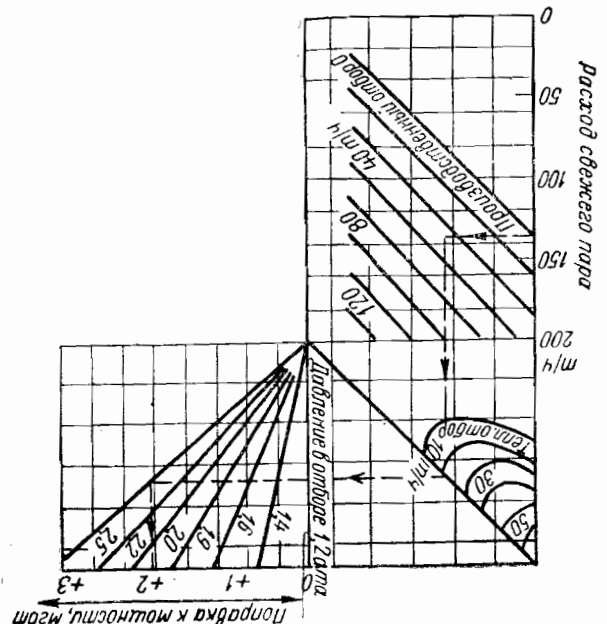
2. Предварительное значение D_{1r} по диаграмме режимов равно 130 м/ч (см. пикетир и точку B).

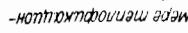
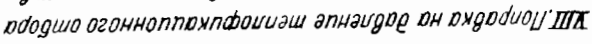
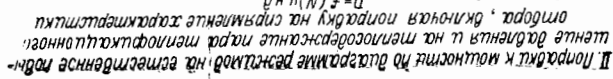
3. По графикам II $\Delta N_3 = -200 + 120 = -80 \text{ кат}$.

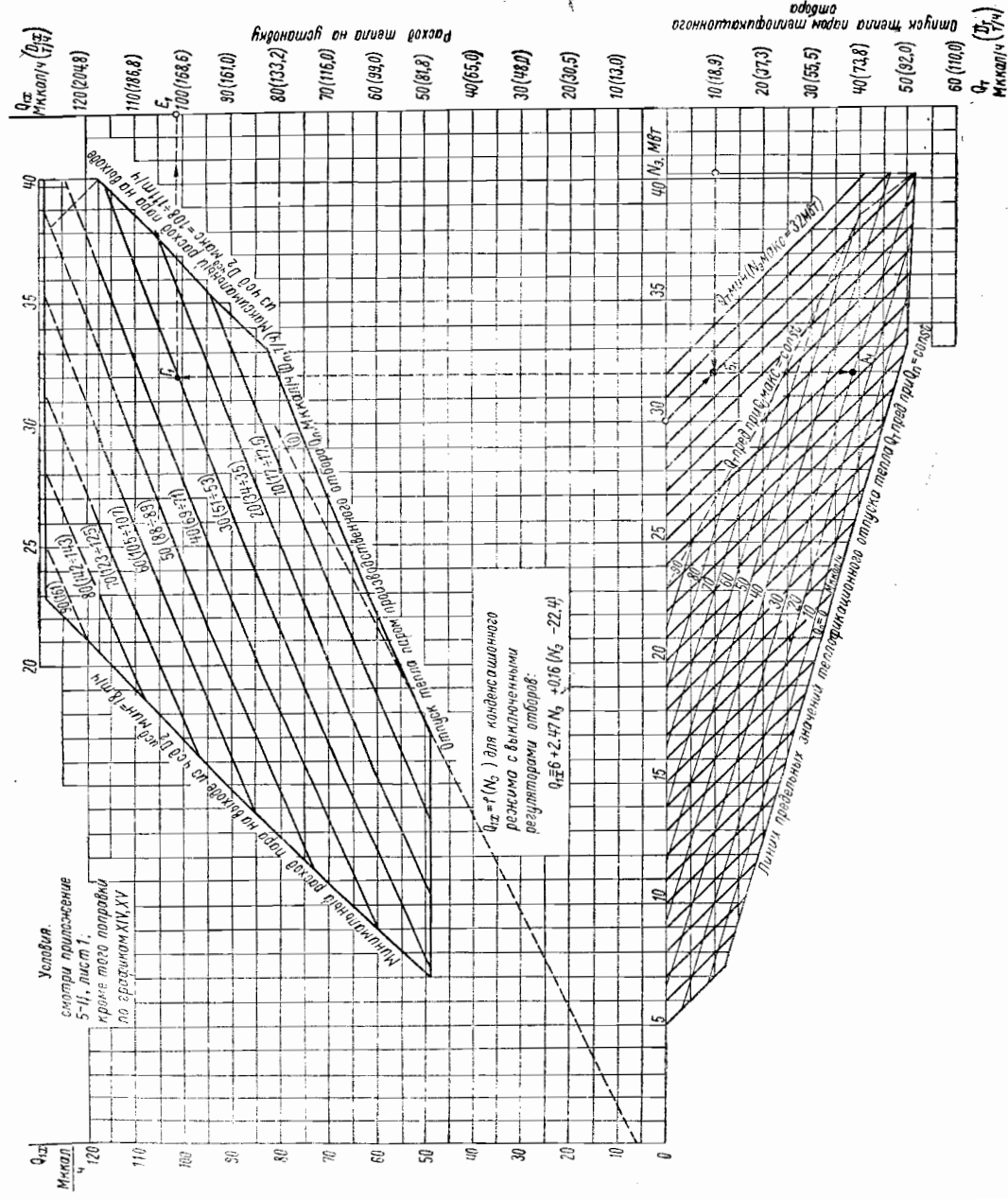
4. По диаграмме режимов для $N_3 = 25,38 \text{ Мвт}$ ($25,3 + 0,08$), $D_n = 20 \text{ м/ч}$ и $D_{1r} = 15 \text{ м/ч}$ окончательное значение $D_{1r} = 130,3 \text{ м/ч}$ (на диаграмме не показано).



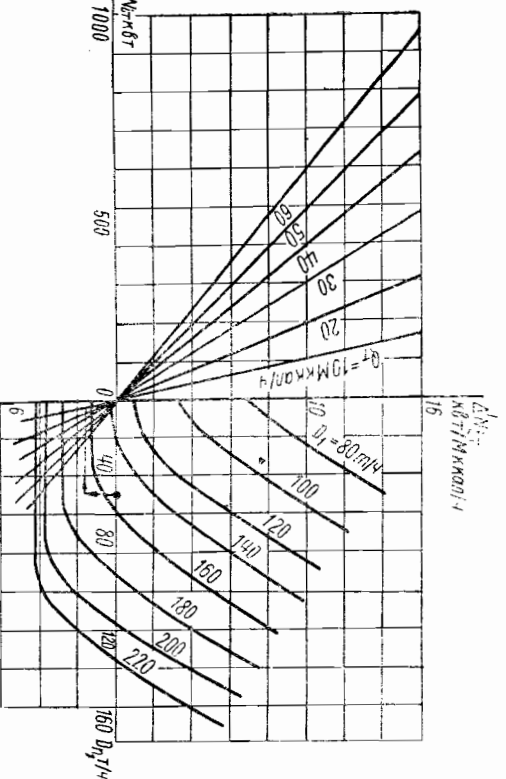
VIII. Поправка на давление меплофкационного отбора



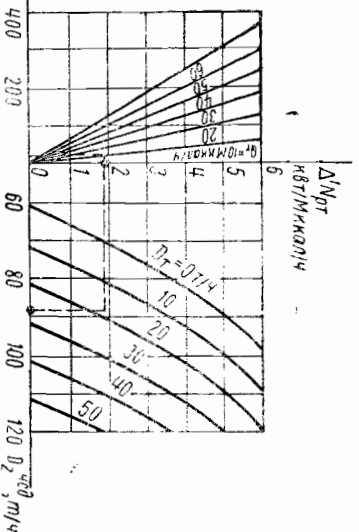
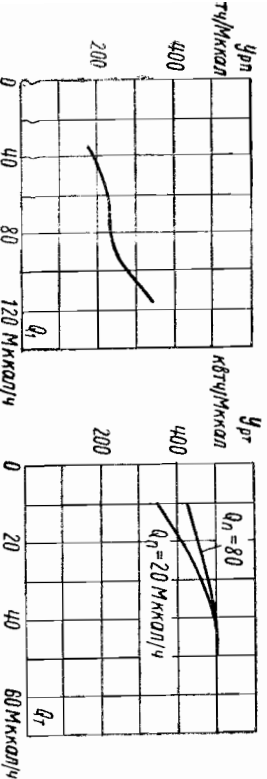




ТЕПЛО ДЛЯ ТУРБИНЫ ТИПА ВПТ-25-3

XIV. Поправка к мощности на теплоспользование пара
теплофикационного отбора.

XV. Дополнительная поправка к мощности на теплоспользование пара теплофикационного отбора в зоне «естественного» повышения его давления

XVI. Удельный прирост теплофикационной выработки электроэнергии (при $p_r = 1,2$ атм).

1. Теплофикационная и конденсационная выработка электроэнергии:

$$N_g^* = (y_{гр} Q_n + y_{гр} Q_r : 10^3) [Мвт],$$

где $y_{гр}$ и $y_{гр}^*$ — средние значения по графикам XVI;

$$N_g^* = N_g - N_g^* [Мвт].$$

2. Расход тепла на теплофикационную и конденсационную выработку электроэнергии:

$$Q_g^* = 0,860 N_g^* : \eta_{эм} [Мкал/ч],$$

$$Q_g^* = 12,3 + 2,12 (N_g^* - \Delta N_g \cdot 10^{-3}) [Мкал/ч],$$

где $\eta_{эм}$ — по графику VI,

ΔN_g — алгебраическая сумма поправок по графикам II, XIV и XV.

3. Расход тепла на установку:

$$Q_1 = Q_g^* + Q_g^* + Q_n + Q_r [Мкал/ч],$$

либо:

$$Q_1 = 12,3 + 2,12 (N_g - \Delta N_g \cdot 10^{-3}) + 0,7 Q_n + 0,42 Q_r [Мкал/ч];$$

$y_{гр} \approx 240$ кат.ч/Мкал и $y_{гр} \approx 470$ кат.ч/Мкал (см. стр. 93).

Пример пользования диаграммой режимов по расходу тепла

Дано:

$$N_g = 30 \text{ Мвт};$$

$$Q_n = 30 \text{ Мкал/ч};$$

$$Q_r = 10 \text{ Мкал/ч};$$

Определяем:

1. Режим возможен, так как он находится в границах диаграммы режимов и Q_r пред $> Q_r$ (по нижней диаграмме в точке A_1 величина Q_r пред 39 Мкал/ч).

2. Предварительное значение Q_1 по диаграмме режимов равно 101 Мкал/ч (см. пунктир и точку E_1).

3. Значения $D_1 \approx 170$ т/ч, $D_n \approx 52$ т/ч и $D_r \approx 19$ т/ч; D_g^* с. д. ≈ 89 т/ч (см. точку В на диаграмме I и пунктир с точкой).

4. По графикам II, XIV и XV

$$\Delta N_g = -240 - 120 - 20 - 20 = -380 \text{ кат.ч.}$$

5. По диаграмме режимов для $N_g = 30,36$ Мвт ($30 + 0,36$); $Q_n = 30$ Мкал/ч и $Q_r = 10$ Мкал/ч окончательный расход тепла на установку $Q_1 = 101,8$ Мкал/ч (на диаграмме не показан).

9. Эксплуатационные измерительные приборы и учет технико-экономических показателей работы установки

В отношении основных измерительных приборов и правильности учета показателей экономичности работы установки ТЭС имеются следующие замечания:

измерение выработки электроэнергии _____

измерение расхода свежего пара и пара регулируемых отборов _____

измерение давления и температуры свежего пара и пара регулируемых отборов, давления выхлопа _____

измерение температуры питательной воды _____

10. Система регулирования

Основные показатели статической и динамической характеристик системы регулирования приведены в табл. 10.

Таблица 10

№ пп.	Наименование величины	Испытание	Проект (норма)
1	Степень неравномерности системы регулирования, %		
2	Степень нечувствительности системы регулирования, %		
3	Повышение числа оборотов при сбросе полной нагрузки, %		

Форма статической характеристики *соответствует* (не соответствует) нормальным требованиям _____

Устойчивость работы при холостом ходе, при синхронизации и под нагрузкой *обеспечивается* (не обеспечивается) _____

Правильность установки элементов системы регулирования _____

Заключение по п. 10: _____

11. Оценка точности результатов испытания

Среднеквадратичная относительная погрешность полученных величин удельного расхода пара, тепла, удельной теплофикационной выработки электроэнергии составляет _____%.

В отношении результатов испытаний насосов и построения графика экономического вакуума см. гл. 7 и 9.

VI. Выводы

Содержание выводов определяется изложенным в § 5-6.

VII. Предложения

Содержание предложений определяется изложенным в § 5-6.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБИНЫ

6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Согласно Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей [Л. 19, § 341] система регулирования должна удовлетворять следующим требованиям:

а) при полностью открытых пусковых клапанах устойчиво удерживать турбину на холостом ходу;

б) обеспечивать при изменении нагрузки плавное (без толчков) перемещение регулирующих клапанов;

в) удерживать скорость вращения вала турбины, не вызывающую срабатывания автомата безопасности при сбросе нагрузки от полной до нуля;

г) обеспечивать плотное закрытие стопорных и регулирующих клапанов.

В целях проверки системы регулирования скорости в отношении выполнения перечисленных требований производят ее испытание с получением двух характеристик:

1) статической характеристики, т. е. взаимной зависимости нагрузки и числа оборотов турбины при их постепенных изменениях и номинальных условиях работы (параметрах пара, тепловой схеме, неизменной установке органов регулирования и парораспределения);

2) динамической характеристики, т. е. возрастания числа оборотов после внезапного сброса полной нагрузки турбины при номинальных условиях работы.

Эти характеристики дают полное представление о работе регулирования при нормальных условиях и при сбросе нагрузки, а также позволяют выявить имеющиеся недостатки в отдельных его элементах.

Ниже излагается методика испытания системы регулирования скорости вращения вала турбины по рис. а в приложении 6-1 для турбины без регулируемых отборов пара.

Система регулирования действует в такой последовательности:

а) изменение числа оборотов n (в результате нарушения равенства между мощностью, развиваемой турбиной, и ее нагрузкой;

б) перемещение муфты центробежного регулятора скорости x ;

в) перемещение поршня сервомотора z (или φ для поворотного сервомотора);

г) изменение мощности турбины N_g .

Поэтому форма связи мощности и числа оборотов или статическая характеристика регулирования зависит от характеристик промежуточных звеньев:

а) характеристики регулятора

$$x = f(n);$$

б) характеристики передачи от муфты к сервомотору

$$z^{см}; \varphi = f(x);$$

в) характеристики парораспределения

$$N_g = f(z^{см}; \varphi)$$

или

$$D_1 = f(z^{см}; \varphi).$$

Первые две характеристики получают из опытов с изменением числа оборотов турбины при холостом ходе, а третью (одновременно и вторую) — из двух равноценных опытов: при наборе и снижении нагрузки турбины или по результатам теплового испытания турбины для указанных выше номинальных условий работы при достаточно малых промежутках хода сервомотора и мощности в опытах.

Для систем гидродинамического регулирования характеристикой регулятора служит зависимость давления масла от числа оборотов турбины

$$p_m = f(n).$$

На остановленной турбине при работе масляного турбонасоса снимают характеристику хода клапанов в зависимости от хода поршня сервомотора:

$$z_{кл} = f(z_{см}),$$

а также измеряют пределы хода муфты и центробежного регулятора между их упорами при снятых пружинах регулятора.

6-2. СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Опыты при холостом ходе турбины

Опыты при холостом ходе проводят при выполнении следующих условий:

А. Условия проведения и режим опытов

а) холостой ход турбины с отключенным от сети генератором без возбуждения; колебания числа оборотов не превышают 0,5;

б) главная паровая задвижка закрыта, а ее обводной клапан открыт настолько, что давление пара перед полностью открытым стопорным клапаном близко к номинальному;

в) синхронизатор полностью выведен — число оборотов турбины минимально;

г) машинист постепенно прикрывает, а затем открывает обводной клапан с обеспечением непрерывного снижения числа оборотов до упора муфты и его обратного непрерывного же повышения со скоростью до 1% в 10 сек, достаточной для записи показаний приборов (при отсутствии автоматической записи);

д) опыт по п. «г» повторяют при таких двух положениях синхронизатора, когда при условиях пп. «а» и «б» начальное число оборотов равно:

номинальному значению,
1,05 — 1,07 номинального значения.

Таким образом, испытание состоит из трех опытов общей продолжительностью до двух часов.

Б. Измерения

Наименования измеряемых величин и способ их измерения в опытах при холостом ходе турбины приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

№ пп.	Измеряемая величина	Способ измерения, измерительный прибор
1	Число оборотов турбины	Узкопредельный тахограф, фиксирующий отклонения от нормального числа оборотов, ручной тахометр с делениями шкалы 0,5% номинального числа оборотов или стрелочный частотомер в цепи статора генератора*
2	Перемещение муфты регулятора скорости	Четкая шкала с остро заточенной или ножевой стрелкой либо пристроенный индикатор
3	Перемещение или угол поворота поршня сервомотора регулирующих клапанов	То же, что в п. 2
4	Давление масла после насоса	Манометр класса 0,35
5	Давление масла в сервомоторе клапанов	Манометр класса 0,35
6	Положение синхронизатора	Соответствующий указатель

* При этом генератор должен быть возбужден.

При отсутствии автоматической записи на каждом пункте измерения должен быть свой наблюдатель. Записи производят одновременно по сигналу, который подает наблюдатель числа оборотов (или его помощник) через каждые 10 или 20 об/мин (0,5—1,0% номинального) снижения или повышения числа оборотов, включая наибольшее установившееся значение в начале и в конце опыта.

Если у наблюдателей число записей за опыт оказывается неодинаковым, — опыт повторяют.

2. Опыты при наборе и снижении нагрузки турбины

А. Условия проведения и режим опытов

Опыты при наборе и снижении нагрузки проводят при выполнении следующих условий:

а) турбина работает при тепловой схеме и параметрах пара, близких к номинальным, с отклонениями от них в пределах нормы (см. стр. 165) при нагрузке около нуля;

б) машинист в согласованном с ДИС порядке синхронизатором повышает нагрузку до полной ступенями в 5—10% полного хода сервомотора (или полной нагрузки) с задержкой на каждой ступени в течение 5 мин для записи показаний приборов;

в) машинист снижает нагрузку от полной примерно до нуля ступенями, указанным в п. «б».

Возможен обратный порядок опытов по пп. «б» и «в».

Расход охлаждающей воды может быть постоянным при введении поправки к мощности на давление выхлопа.

При соответствующей нагрузке включается или выключается регенеративная система и производятся необходимые изменения тепловой схемы турбины согласно эксплуатационной инструкции.

Б. Измерения

Во время испытания измеряют по проверенным эксплуатационным приборам следующие величины:

- а) мощность на зажимах генератора;
- б) расход свежего пара;
- в) давление и температуру пара перед стопорным клапаном;
- г) давление пара за дроссельным и регулирующими клапанами, в регулирующей ступени и на выхлопе;
- д) расход и температуру питательной воды;
- е) давление масла за насосом и в сервомоторах клапанов;
- ж) ход сервомоторов клапанов и муфты регулятора скорости;
- з) положение синхронизатора;
- и) число оборотов турбины.

Все измерения производят одновременно по сигналу через 1—2 мин — всего три записи на каждой ступени нагрузки. На одного наблюдателя приходится до пяти пунктов измерений.

Общая продолжительность опытов — около 8 час.

3. Опыты на остановленной турбине

А. Условия проведения и режим опытов

Опыты на остановленной турбине заключаются в следующем.

а) на остановленной турбине центробежный регулятор собирают без пружин, с приспособлением для перемещения

вручную муфты регулятора, и включают в работу масляный насос;

б) смещают муфту регулятора от нижнего упора до верхнего ступенями по 5% полного хода муфты для измерений на каждой ступени по п. «Б» (см. ниже). Вместе с тем проверяют отсутствие задеваний и преждевременного ограничения хода подвижных элементов.

Если давление масла недостаточно, золотник сервомотора на каждой ступени приводится в среднее положение принудительным перемещением сервомотора вручную посредством специального приспособления.

Б. Измерения

При указанных в п. «б» перемещениях муфты регулятора производят измерения следующих величин:

- а) хода муфты регулятора;
- б) хода поршня сервомотора;
- в) давления масла после насоса;
- г) давления масла в сервомоторе клапанов;
- д) хода регулирующих клапанов;
- е) положения синхронизатора (выведенное).

4. Обработка опытных величин

По результатам измерений в опытах при холостом ходе строят характеристики $x = f(n)$ и $z^{см} = f(x)$ в третьем и втором квадрантах по приложению 6-2.

В каждом опыте величины x и z для одинаковых значений n должны быть одни и те же, либо при повышении числа оборотов x меньше, а z больше, чем при понижении, как результат запаздывания хода муфты и сервомотора (против изменения числа оборотов), вследствие нечувствительности элементов регулирования.

Опытные величины мощности и расхода свежего пара, полученные при наборе и снижении нагрузки турбины, приводят к следующим условиям характеристики с простейшим учетом главных поправок:

$$D_{1x} = D_{1оп} \frac{p_{1x}}{p_{1оп}} \sqrt{\frac{T_{1оп}}{T_{1x}}};$$

$$N_{\text{ex}} = N_{\text{зоп}} \frac{D_{1x}}{D_{1оп}} + \Delta' N_{p_2} (p_{2x} - p_{2оп}).$$

По приведенным величинам $N_{\text{эx}}$ или D_{1x} строят характеристику $N_{\text{эx}} = f(z^{\text{см}})$ или $D_{\text{1x}} = f(z^{\text{см}})$ в первом квадранте приложения 6-2.

Для турбины с регулируемым отбором пара следует построить характеристику $D_{\text{1x}} = f(z^{\text{см}})$.

Статическую характеристику регулирования в четвертом квадранте получают путем построения, показанного в приложении 6-2, по шести-десяти произвольным точкам графика первого квадранта. Из построенных характеристик определяют:

а) степень нечувствительности регулятора ε_p , т. е. предельные отклонения ($\pm$) числа оборотов в процентах, не вызывающие смещения муфты регулятора;

б) степень нечувствительности системы регулирования $\varepsilon_{\text{ср}}$, т. е. предельные отклонения ($\pm$) числа оборотов в процентах, не вызывающие смещения сервомотора или изменения нагрузки;

в) степень неравномерности системы регулирования δ , т. е. изменение числа оборотов в процентах, отвечающее изменению электрической нагрузки от нуля до полной при неизменном положении синхронизатора и номинальных условиях работы.

Общая неравномерность регулирования может быть получена из данных испытания на холостом ходу:

$$\delta = \frac{\Delta n_p}{n_n} \cdot 100 [\%],$$

где Δn_p — изменение числа оборотов в пределах рабочего хода муфты x_p или хода сервомотора z_p .

Результаты измерений при остановленной турбине используют для определения запасов Δx_1 и Δx_2 хода муфты во втором и третьем квадрантах приложения 6-2.

5. Заключение

Полученную статическую характеристику регулирования оценивают путем сравнения ее с показанной в приложении 6-1 нормальной характеристикой в отношении предъявляемых требований:

а) $n_A \geq 1,005 n_n$, что позволяет набрать полную нагрузку при повышенной на 0,5% частоте в сети, это значит, что при введенном (полностью или частично)

синхронизаторе на холостом ходу достигается число оборотов турбины, равное

$$n_A = \left(1 + \frac{\delta}{100} + 0,005\right) n_n;$$

б) $n_B \leq 0,97 n_n$, что позволяет разгрузить турбину до нуля и включить ее при пониженной (не более чем на 3%) частоте в сети; это значит, что при выведенном синхронизаторе число оборотов турбины на холостом ходу ниже номинального не менее чем на 3%;

в) $n_B < 1,06 n_n$, т. е. неравномерность регулирования $\delta < 6\%$ — для обеспечения удержания холостого хода при сбросе полной нагрузки, поскольку автомат безопасности настроен на 1,10—1,12 n_n , а «заброс» числа оборотов равен 1,2—1,8 δ ; для крупных турбин это необходимо и в отношении участия их в поддержании нормальной частоты тока в энергосистеме;

г) $n_B > 1,03 n_n$, т. е. неравномерность регулирования $\delta > 3\%$ — для обеспечения устойчивости нагрузки при нормальных колебаниях частоты тока;

д) кривая статической характеристики в четвертом квадранте не должна иметь горизонтальных или слишком пологих участков с местной неравномерностью менее 2% (см. п. 4 приложения 6-1); форма характеристики определяется в основном характером кривой первого квадранта приложений 6-1 и 6-2 или открытием проходного сечения клапанов в зависимости от хода сервомотора, так как характеристики $x = f(n)$ и $z = f(x)$ обычно прямолинейны (исключая систему связи муфты с поворотным сервомотором через профильную шайбу);

е) нечувствительность регулятора $\varepsilon_p \leq 0,3\%$; нечувствительность системы регулирования $\varepsilon_{\text{ср}} \leq 0,6\%$;

ж) запасы хода муфты до нижнего и верхнего упоров: $\Delta x_1 = 0,1 x_p$; $\Delta x_2 = 0,2 \div 0,3 x_p$, для обеспечения полного открытия клапанов (полного хода сервомотора) и надежного быстрого закрытия их при сбросе нагрузки.

6-3. ИСПЫТАНИЕ СО СБРОСОМ НАГРУЗКИ

Опыты со сбросом нагрузки проводят в порядке ее возрастания: 50, 75 и 100% полного расхода пара (для режима без регулируемых отборов пара и то же при максимальном их значении для турбин с отбором).

А. Условия проведения и режим опытов

К опытам со сбросом нагрузки приступают при выполнении следующих условий:

а) статическая характеристика регулирования отвечает требованиям:

$$\delta < 6\%; \quad \varepsilon_{\text{ср}} \leq 0,6\%;$$

б) регулирование обеспечивает:

устойчивое число оборотов ($\pm 0,5\%$ — по допустимой степени нечувствительности) и плавное его изменение посредством синхронизатора при холостом ходе и полном давлении пара перед открытым стопорным клапаном, при открытых задвижках на линиях регулируемых отборов, присоединенных к действующим магистралям;

устойчивую нагрузку и плавное ее изменение синхронизатором в пределах от нуля до полной;

в) автомат безопасности при холостом ходе перед сбросом испытан сначала выключением от руки, а затем повышением числа оборотов и действует исправно, т. е. срабатывает при числе оборотов больше нормального на 10—12%; при этом число оборотов падает нормально — по кривой выбега;

г) обратные и предохранительные клапаны на линиях отборов проверены и действуют исправно; задвижки на линиях отборов и свежего пара прикрыты до появления заметного дросселирования; плотность закрытия стопорного и регулирующего клапанов проверена по падению числа оборотов турбины при холостом ходе и оказалась удовлетворительной;

д) программа испытания утверждена главным инженером ТЭС;

е) при подготовке и проведении испытания присутствует начальник машинного цеха или его заместитель;

ж) дежурный персонал машинного цеха и ДИС предупрежден о предстоящем сбросе, знакомы с программой испытания и подготовлены в отношении сигналов, последовательности операций и действий при возможных аварийных моментах;

з) у рычага выключения автомата безопасности, у автоматического стопорного клапана, у главной запорной задвижки и у задвижек на регулируемых отборах расставлены дежурные на случай необходимости быстрого отключения турбины от паропроводов;

и) турбина работает по нормальной тепловой схеме при нагрузке, намеченной к сбросу, и при нормальных параметрах пара с отклонениями до $\pm 5\%$;

к) в опыте со сбросом полной нагрузки синхронизатор введен не более, чем необходимо для достижения заданной нагрузки;

л) по согласованному сигналу дежурный электрошита отключает генератор от сети с сохранением возбуждения;

м) после сброса турбина вновь включается в сеть и готовится к проведению следующего опыта.

В случае срабатывания автомата безопасности последующие опыты сброса не проводят, ибо при этом регулирование нуждается в наладке.

В случае повышения числа оборотов сверх предела (10—12%), на который настроен автомат безопасности, необходимо выключить его от руки, сорвать вакуум (закрыть пар на эжектор), быстро закрыть задвижки на линиях отборов и свежего пара.

Б. Измерения

Непосредственно перед сбросом нагрузки производят запись следующих величин по проверенным эксплуатационным приборам (кроме п. «и»):

а) мощность на зажимах генератора;

б) расход свежего пара и пара отборов;

в) давление и температуру пара перед стопорным клапаном и на выходе;

г) давление пара за клапанами и в камерах регулируемых отборов;

д) давление масла в системе регулирования и под поршнем сервомотора;

е) ход поршня сервомотора и муфты регулятора;

ж) положение синхронизатора;

з) время;

и) число оборотов вала турбины — по стационарному тахометру турбины и по узкопредельному тахографу, либо по ручному тахометру и стрелочному частотомеру (но не менее чем по двум приборам).

За 1—2 сек до сигнала сброса включают автоматическую запись по пп. «а», «г», «д», «е», «и» на осциллограф. Если такая запись отсутствует, включают тахограф или ручной тахометр, частотомер и отмечают максимальное

и установившееся числа оборотов после сброса; наблюдателями в данном случае являются руководитель испытания с представителем ТЭС и их помощники.

При срабатывании автомата безопасности анализ причин неудовлетворительной динамической характеристики регулирования при нормальной статической его характеристике и плотном закрытии паровпускных клапанов возможен лишь при наличии записи основных величин на осциллограф. Для такой записи требуется специальное оборудование с применением безынерционных датчиков-преобразователей измеряемых величин в электрические величины.

В. Заключение

Заключение о результатах испытания дают с точки зрения выполнения основных требований: после сброса полной нагрузки наибольшее число оборотов не превышает 1,08—1,1 номинального, автомат безопасности не срабатывает; турбина продолжает вращаться на холостом ходу с числом оборотов, отвечающим положению синхронизатора при полной нагрузке, т. е. больше номинального на величину степени неравномерности регулирования δ [%].

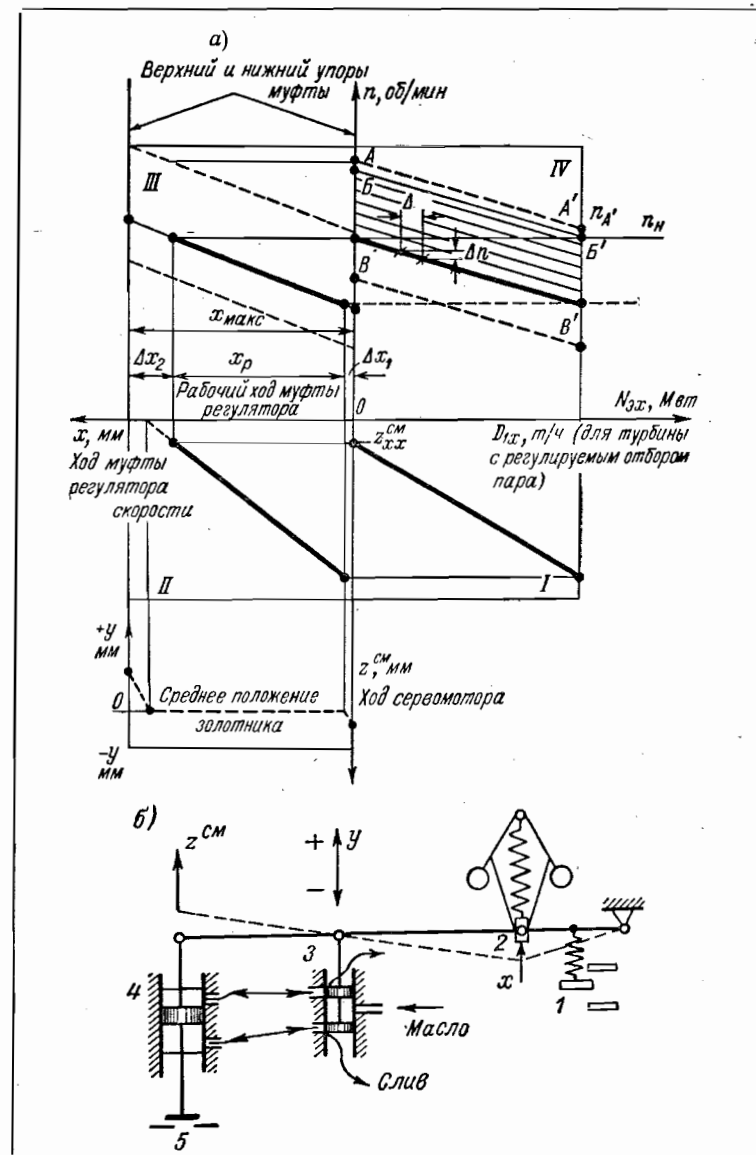
Причинами превышения указанного числа оборотов являются запаздывание закрытия паровпускных и обратных клапанов, влияние сообщенного с турбиной парового объема после их закрытия, а также неплотность их закрытия.

Анализ результатов автоматической записи величин производят путем определения запаздывания (по отношению к моменту сброса нагрузки) и характера изменения основных величин: числа оборотов, перемещения муфты регулятора и поршня сервомотора, давления масла в сервомоторе и пара за регулирующими клапанами, а также в камерах регулируемых отборов.

Об испытании и наладке систем регулирования см. [Л. 7, 21, 27, 32], а также соответствующие выпуски «Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС» (Госэнергоиздат).

Приложения к шестой главе

6-1. Нормальная статическая характеристика регулирования (скорости). 6-2. Статическая характеристика регулирования (скорости).



Предъявляемые требования

1. Регулирование позволяет набрать полную нагрузку (полностью сместить сервомотор в сторону открытия парораспределения) при реально возможном повышении частоты тока в сети или числа оборотов турбины сверх номинального на 0,5%:

$$n_{A'} \geq 1,005 n_n.$$

2. Регулирование позволяет полностью разгрузить турбину (полностью переместить сервомотор в сторону закрытия парораспределения) при пониженной на 3% частоте тока сети:

$$n_B \leq 0,97 n_n.$$

3. Степень неравномерности регулирования $\delta > 3\%$, что необходимо для устойчивого поддержания нагрузки турбины при малых колебаниях частоты в сети и ослабления влияния нечувствительности регулирования; вместе с тем $\delta < 6\%$ — для защиты турбины от разгона в случае сброса электрической нагрузки, поскольку «заброс» числа оборотов обычно равен $1,2-1,8 \delta$ и не должен быть больше 10—12%, на которые настраивается автомат безопасности:

$$1,06 n_n > n_B > 1,03 n_n,$$

где

$$n_B = \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) n_n.$$

4. Линии статической характеристики AA' ; BB' не имеют горизонтальных или слишком пологих участков; на любом участке местная неравномерность (см. рис. а)

$$\delta' = \frac{\Delta n N_{э \text{ макс}} \cdot 100}{\Delta N_{э} n_n} \geq 2\%.$$

5. Нечувствительность (см. стр. 336) составляет:

регулятора $\epsilon_p \leq 0,3\%$;
системы регулирования $\epsilon_{cp} \leq 0,6\%$.

6. Запасы хода муфты регулятора в стороны открытия и закрытия парораспределения:

$$\Delta x_1 \approx 0,1 x_p;$$

$$\Delta x_2 \approx 0,2 + 0,3 x_p.$$

7. Для турбины с регулируемым отбором пара характерно повышение числа оборотов, соответствующее полной паровой нагрузке от D_{xx} холостого хода до $D_{1 \text{ макс}}$; оно не должно быть более 10%.

Примечания к рисункам

На рис. а заштрихована зона смещения характеристики BB' синхронизатором при изменениях нагрузки от нуля до максимума при $n = n_n$.

AA' и BB' — статические характеристики при крайних положениях синхронизатора;

A и B — крайние точки возможного смещения характеристики при холостом ходе;

A' и B' — то же, при полной нагрузке;

$n_B = n_n$ — номинальное число оборотов;

y — ход золотника в буксе: вверх (+), вниз (—);

I — характеристика парораспределения;

II — характеристика передачи от муфты к сервомотору;

III — характеристика регулятора;

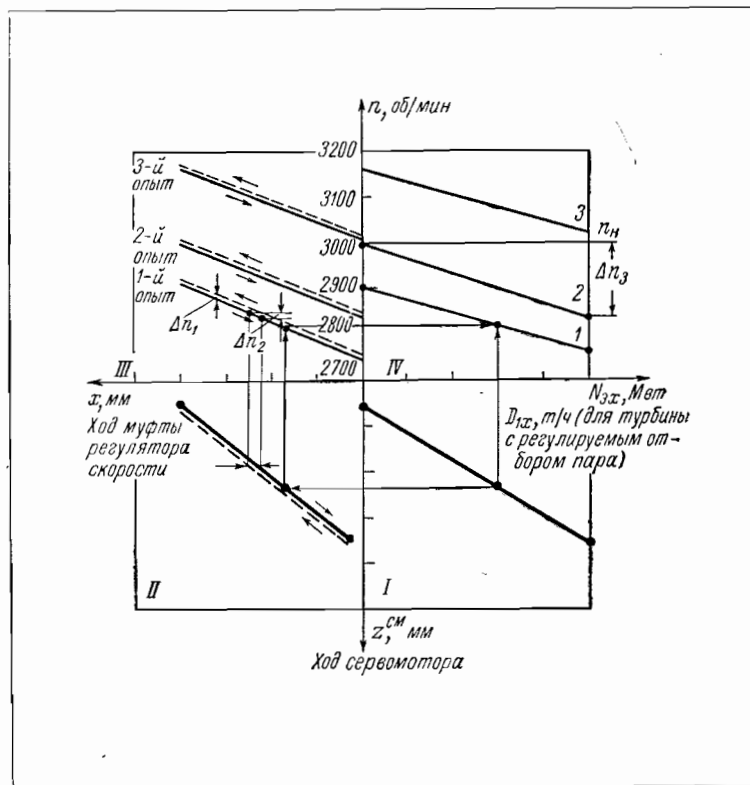
IV — статическая характеристика регулирования.

На рис. б приняты следующие обозначения:

1 — синхронизатор; 2 — муфта регулятора; 3 — золотник регулятора; 4 — сервомотор; 5 — паровпускные клапаны.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6-2

Статическая характеристика регулирования (скорости)



Данные опытов при холостом ходе

1-й опыт			2-й опыт			3-й опыт		
п. об/мин	х, мм	z _{см} , мм	п. об/мин	х, мм	z _{см} , мм	п. об/мин	х, мм	z _{см} , мм
			3000					
			2980					
			2780					
			2800					
			2800					
			2820					
			2840					
			3000					

Примечания:

1. Нечувствительность регулятора

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta n_1}{n_n} \cdot 100 [\%].$$

2. Нечувствительность системы регулирования

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta n_2}{n_n} \cdot 100 [\%].$$

3. Степень неравномерности регулирования

$$\delta = \frac{\Delta n_3}{n_n} \cdot 100 [\%].$$

4. Стрелки в квадрантах II и III указывают направление изменения числа оборотов во время опытов.

5. Тонкая сплошная линия со стрелкой указывает способ построения графиков квадранта IV по графикам квадрантов I, II и III. Число точек для построения (6—10) зависит от криволинейности графика в квадранте I.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

7-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Паротурбинную установку обслуживают циркуляционные, конденсатные и сливные (дренажные) центробежные электронасосы.

Экономичность работы насоса определяют перечисленные ниже величины.

1. Подача Q [$\text{м}^3/\text{ч}$] — объем жидкости, подаваемой насосом через напорный патрубок, или весовая подача G [$\text{т}/\text{ч}$] — весовое выражение указанного объема жидкости.

2. Напор H [м] — прирост в насосе удельной энергии подаваемой жидкости, выраженный в метрах столба этой жидкости:

$$H = \frac{P_n}{\gamma_n} - \frac{P_v}{\gamma_v} + (z_n - z_v) + \frac{c_n^2 - c_v^2}{2g},$$

где P_n и P_v — давление на выходе из насоса и на входе в насос, $\text{кг}/\text{м}^2$;

$z_n - z_v$ — разность высот между местами измерения давлений P_n и P_v , м ;

c_n и c_v — средние скорости жидкости в пунктах измерения давлений P_n и P_v , $\text{м}/\text{сек}$;

γ_n и γ_v — вес единицы объема подаваемой жидкости в пунктах измерения P_n и P_v , $\text{кг}/\text{м}^3$;

g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{сек}^2$.

В применении к весовой подаче G вместо напора употребляют давление, развиваемое насосом P [$\text{кг}/\text{см}^2$] — для питательных насосов.

3. К. п. д. насоса η_n и установки η_y :

$$\eta_n = \frac{QH\gamma_{\text{ср}}}{102 \cdot 3600 N_{\text{в}}}, \quad \eta_y = \eta_n \eta_{\text{э}},$$

где Q — подача, $\text{м}^3/\text{ч}$;

H — напор, м ;

$\gamma_{\text{ср}}$ — удельный вес, $\text{кг}/\text{м}^3$ — см. ниже;

$N_{\text{в}}$ — мощность, потребляемая насосом, на валу насоса, квт ;

$\eta_{\text{э}}$ — к. п. д. электропривода насоса;

4. К. п. д. регулирования:

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{э}} N_{\text{с}}} \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{р}}}{H} \right),$$

где $N_{\text{с}}$ — мощность, потребляемая из сети, квт ;

$\Delta H_{\text{р}}$ — потеря напора в регулирующей задвижке насоса на нагнетании, м .

При отсутствии регулирования числа оборотов насоса

$$N_{\text{с}} \approx \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{э}}}.$$

5. К. п. д. тракта:

$$\eta_{\text{тр}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{тр}}}{H - \Delta H_{\text{р}}} \right),$$

где $\Delta H_{\text{тр}}$ — потеря напора на тракте от пункта измерения $P_{\text{в}}$ до места потребления (деаэратор, конденсатор и т. п.), м .

С увеличением подачи к. п. д. регулирования возрастает, а к. п. д. тракта понижается.

Таким образом, полный к. п. д. всей системы насосной установки, включая тракт и регулирование, равен:

$$\eta_{\text{сн}} = \eta_n \eta_{\text{э}} \eta_{\text{рег}} \eta_{\text{тр}}.$$

Основными характеристиками центробежного насоса являются:

а) характеристика $H = f(Q)$ или $P = f(G)$ — зависимость напора от подачи;

б) характеристика $N_{\text{с}} = f(Q)$ или $N_{\text{с}} = f(G)$ — зависимость мощности, потребляемой установкой, от подачи;

в) характеристики $\eta_n = f(Q)$ и $\eta_y = f(Q)$ — зависимость к. п. д. насоса и к. п. д. установки от подачи, а также $\eta_{\text{рег}} = f(Q)$ и $\eta_{\text{сн}} = f(Q)$ — к. п. д. регулирования и всей системы насосной установки.

7-2. ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Испытание насоса заключается в проведении ряда опытов по специальной программе, которую составляют по следующей примерной форме, общей для насосов любого другого назначения — питательных, сетевых, а также для турбонасосов с учетом их особенностей, рассматриваемых ниже.

„Утверждаю“: Гл. инженер ТЭС _____

« » _____ 196 г.

Программа

испытания _____ насоса, стационарный № _____

Дата испытания _____

1. Цель испытания

Целью испытания насоса является получение его рабочих характеристик, т. е. зависимости развиваемого напора H [м], потребляемой мощности $N_{\text{с}}$ [квт], к. п. д. насоса η_n [%] и насосной установки η_y [%] от подачи Q [м³/ч] насоса в нормальных эксплуатационных условиях.

2. Паспортные данные насосной установки

Паспортные данные насосной установки приведены в табл. 7-1.

Таблица 7-1

Насос	Привод насоса
Завод _____	Завод _____
Заводский № _____	Заводский № _____
Тип _____	Тип _____
Q , $\text{м}^3/\text{ч}$ _____	U , в (p_1 , ата) _____
H , м _____	I , а (t_1 , °C) _____
n , об/мин _____	n , об/мин _____
η_n , % _____	N , квт, (p_2 , ата) _____

Примечание. В скобках приводятся данные для турбинного привода.

3. Условия проведения и режим опытов

1. Испытание состоит из шести-восьми опытов при следующих устойчивых значениях подачи насоса от нуля — при закрытой задвижке на нагнетании — до максимума: 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 паспортной подачи и более.

Максимум подачи ограничен:

а) наименьшим напором, т. е. наименьшим допустимым давлением в системе нагнетания (для циркуляционных насосов разрежение в сифоне — до 400 мм рт. ст.) при наибольшем давлении на входе в насос и полном открытии задвижек на линиях нагнетания и всасывания (по необходимости прикрывают задвижки на нагнетании у параллельно работающих насосов);

б) номинальной или допустимой мощностью привода;

в) кавитационными явлениями (сопровожаемыми резким снижением напора, к. п. д., потребляемой мощности).

Подачу насоса изменяют посредством задвижки на нагнетании.

Продолжительность одного опыта составляет 5—10 мин в зависимости от устойчивости величин, а холостого хода — 1—2 мин (для питательных насосов высокого давления и для осевых насосов холостой ход недопустим).

Общая продолжительность испытания доходит до 2—3 час.

2. Испытательная схема позволяет осуществить условия п. 1 и правильное измерение величин по п. 4 (см. ниже).

4. Измерения

Наименования измеряемых величин и способ их измерения приведены в табл. 7-2.

Пункты 6—9 служат для общей оценки работы насоса, потерь трения в сальниках, подшипниках и гидравлических потерь.

Запись показаний приборов — одновременная, по сигналу через одну минуту (кроме пп. 6—9).

Таблица 7-2

№ п/п.	Измеряемая величина	Способ измерения, измерительный прибор
1	Давление на входе в насос p_v и на выходе из него p_n в камере разгрузочного диска, после задвижки на нагнетании (в коллекторе) и у потребителя	Манометр класса 0,35; для $p < 2,0$ атм — ртутный манометр *
2	Температура воды на входе в насос и на выходе из него	Ртутный термометр
3	Подача — расход воды, подаваемой насосом	Диафрагма на линии всасывания или нагнетания и двухстекольный дифманометр **
4	Число оборотов насоса	Ручной тахометр
5	Потребляемая мощность	По схеме двух ваттметров с приборами класса 0,5 или электросчетчик того же класса с секундомером
6	Выбег — время от момента отключения привода до полной остановки вала насоса	Секундомер
7	Утечка через уплотнения концов вала (должна быть в виде капель)	Мерная посуда
8	Утечка через разгрузочный диск	Диафрагма на линии разгрузки и дифманометр
9	Температура масла подшипников	Ртутный термометр

* Без задвижек и клапанов между точками измерения p_v и p_n .

** Без посторонних подводов и отводов воды между диафрагмой и насосом

5. Подготовительные работы

1. Установка и присоединение двух дифманометров к диафрагмам на линии всасывания (нагнетания) и на линии разгрузки.

2.

6. Организационная часть

1. Для участия в проведении испытания и обеспечения необходимых режимов работы ТЭС выделяет ответственного представителя т. _____

Представитель ЭЛ _____

Согласовано:

Начальник ПТО _____

Начальник машинного цеха _____

Начальник электроцеха _____

Начальник ЦТК _____

7-3. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ КОНДЕНСАТНОГО, СЛИВНОГО И ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСОВ

Испытание конденсатного и сливного насосов производят:

а) при остановленной турбине с заполнением конденсатора водой и подачей ее через рециркуляцию (после диафрагмы) в конденсатор либо в мерный бак — во время тарировки диафрагмы;

б) при работе турбины с изменением режима ее нагрузки. При таком нормальном режиме работы учитывается влияние кавитации. Диафрагма должна находиться на линии нагнетания.

При испытании крупного циркуляционного насоса его подачу определяют из формулы теплового баланса конденсатора (см. приложение 9-1):

$$W = \frac{D_2 \Delta t_2 + \Delta Q}{t_{B2} - t_{B1}}.$$

Вся вода от насоса должна поступать в конденсатор одной действующей турбины, водяную плотность которого проверяют опрессовкой при остановленной турбине и контролируют по данным химического анализа конденсата во время опытов.

Все потоки воды в паровое пространство конденсатора, в том числе дренажи из подогревателей, исключают. Дренаж из эжектора вычитают из замеренного расхода конденсата.

Расход пара в конденсатор поддерживают постоянным (с упором парораспределения) и наибольшим, при этом

выше нагрев охлаждающей воды в конденсаторе и меньше погрешность его измерения, а также измерения расхода конденсата.

Давление пара в конденсаторе может изменяться от минимума до 0,1 ата, что при минимальной подаче легче выполнить в зимнее время при низкой температуре охлаждающей воды. При необходимости опыты с подачей 0,2, а также 0,4 паспортной величины можно исключить, как не имеющие практического значения.

Опыт начинают по достижении устойчивости и одинаковой на сливах (до $\pm 0,5^\circ \text{C}$) температуры охлаждающей воды при минимальном уровне конденсата и заканчивают через 15—20 мин при том же уровне.

Дополнительно (к п. 4 программы испытания) производят измерения, связанные с определением расхода циркуляционной воды:

а) температуры охлаждающей воды на входе и на выходе у конденсатора (справа, слева, общей) — ртутными термометрами с ценой деления $0,1^\circ \text{C}$;

б) расхода и температуры конденсата из конденсатора — диафрагмой с двухстекольным дифманометром и ртутным термометром;

в) расхода неустраимых побочных потоков воды в конденсатор: из эжектора, подогревателей, а также утечки — по уравнениям теплового баланса или иным путем соответственно местным условиям;

г) расхода неустраимых отводов охлаждающей воды (на маслоохладители и др.) — диафрагмой с малым перепадом давления — до 0,5 м вод. ст. или по ориентировочной оценке, если расход меньше 1% паспортной подачи насоса;

д) уровня конденсата в конденсаторе в начале и в конце опыта.

7-4. ИСПЫТАНИЕ ТУРБОНАСОСА

В программу испытания насоса с паротурбинным приводом включают следующие дополнительные пункты:

в условия характеристики и условия проведения опытов:

а) давление и температуру пара перед стопорным клапаном;

б) давление выхлопа — паспортные или нормальные эксплуатационные значения;

в измерения:

а) давление и температуру пара перед стопорным клапаном и на выходе — манометром класса 0,35 и термомпарами; давление меньше 2 ата — ртутным манометром;

б) давление пара при входе в проточную часть — манометром класса 0,35;

в) расход свежего пара на турбину, давление и температуру пара у диафрагмы — двухстекольным дифманометром, манометром класса 0,35 и термомпарой;

г) число оборотов турбины — ручным тахометром.

Точность измерения температур пара — до 1° С. Электрические измерения отсутствуют.

Опыты при всех подачах (см. п. 1 программы испытания) проводят дважды:

1) при номинальном числе оборотов и изменении подачи насоса посредством задвижки на линии нагнетания;

2) при переменном числе оборотов и полностью открытых задвижках на линиях всасывания и нагнетания.

Кроме того, следует провести один опыт при полной нагрузке и полном открытии парораспределения со сниженным по необходимости давлением пара перед стопорным клапаном, т. е. при минимальном дросселировании.

7-5. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Обработка опытных данных, построение рабочей характеристики насоса, а также примерное их оформление показаны в приложениях 7-1 и 7-2. Там же помещают испытательную схему, паспортные данные и таблицу результатов испытания насоса.

Рабочая характеристика насоса должна иметь координатную сетку, общую для всех величин, а шкалы для них должны начинаться от нуля и содержать в одной клетке любого размера $1 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$ единиц, где n — целое положительное число или нуль. Нули шкал по высоте можно сместить для большей наглядности графика.

7-6. ОТЧЕТ ОБ ИСПЫТАНИИ

Отчет об испытании насоса может состоять из указанных выше приложений 7-1 и 7-2, а также краткого заключения, выводов и предложений, примерное содержание которых изложено ниже.

1. Заключение

1. Наибольшая подача насоса в опытах составляет _____ $\text{м}^3/\text{ч}$, или — % паспортной величины, при напоре — м , при условиях работы: _____

2. Сравнения опытных величин с паспортными при одинаковых числах оборотов:

а) подача при паспортном напоре (_____ м) составляет _____ $\text{м}^3/\text{ч}$, или _____ % паспортной величины;

либо:

напор при паспортной подаче (_____ $\text{м}^3/\text{ч}$) составляет _____ м , или _____ % паспортной величины;

б) к. п. д. насоса при паспортной подаче составляет _____ %, по паспорту _____ %;

3. Показатели работы в эксплуатационных условиях:
а) для конденсатных и сливных насосов (с заданной подачи) — см. табл. 7-3;

Таблица 7-3

Наименование величины	Подача	
	максимальная	характерно- но-дли- тельная
	$\text{м}^3/\text{ч}$	$\text{м}^3/\text{ч}$
К. п. д. насоса, %		
» привода, %		
» регулирования, %		
» тракта, %		
» всей системы насосной установки, %		
Потребляемая мощность, квт		
Загрузка двигателя, %		
Расход пара на турбопривод, $\text{т}/\text{ч}$:		
при номинальном числе оборотов . . .		
при переменном числе оборотов и открытых задвижках на линиях всасывания и на- гнетания		

б) для циркуляционных насосов (с заданным напором — при открытых задвижках и нормальном давлении в системе всасывания и нагнетания):

наибольшая подача _____ м³/ч
 напор _____ м
 к. п. д. насоса _____ %
 » привода _____ %
 » тракта _____ %
 » системы _____ %
 потребляемая мощность _____ кВт
 расход пара на турбопривод _____ т/ч
 загрузка двигателя _____ %

4. Наличие кавитационных явлений во время опытов и при эксплуатационных условиях работы _____.

5. Показатели работы турбопривода при полной нагрузке насоса и при номинальных условиях ($p_{1х} = \text{---} \text{ атм}$; $t_{1х} = \text{---} ^\circ\text{C}$; $p_{2х} = \text{---} \text{ атм}$; $n = \text{---} \text{ об/мин}$), приведены в табл. 7-4.

Таблица 7-4

Наименование величины	Режим работы	
	нормальное открытие парораспре- деления	полное от- крытие паро- распреде- ния ($p_1 = \text{---}$ атм)
Расход пара на турбину, т/ч		
Мощность на валу турбины, кВт		
Падение давления в паровпускных кла- панах, атм:		
I		
II		
Внутренний относительный к. п. д. турбины, включая дросселирование, %		
То же, проточной части (исключая дросселирование), %		

6. Число часов работы насоса до момента испытания: после монтажа _____; после ревизии _____.

2. Выводы и предложения (в зависимости от содержания пп. 1—6)

По развиваемому напору, подаче и к. п. д. насос *отвечает (не отвечает)* требованиям эксплуатации.

В целях повышения к. п. д. насосной установки и повышения (понижения) напора рекомендуется:

1) вскрытие насоса для проверки зазоров и диаметра рабочих колес по заводскому формуляру, для устранения загрязнений и износа проточной части;

2) наращивание (обточка) рабочих колес по диаметру (удаление одного-двух колес);

3) устранение кавитации путем снижения температуры и повышения давления воды (уровня), уменьшения сопротивлений трубопроводов на линии всасывания, изменения рабочей схемы трубопроводов;

4) изменение числа оборотов, замена привода, замена насоса;

5) установка дополнительного насоса — более экономичного для некоторых эксплуатационных режимов работы;

6) уменьшение потерь на тракте и в регулировании;

7) более полное использование сифона (для циркуляционных насосов) или располагаемого подпора на линии всасывания.

Для общей оценки эксплуатационных качеств насоса обращают внимание и на показатели надежности его работы, удобство обслуживания и ремонта, безремонтный срок службы насоса (отдельных изнашиваемых деталей — сальниковых уплотнений, рабочих колес, утечки масла, сроки его замены и др.).

Предлагаемые мероприятия должны быть обоснованы расчетом их эффективности и срока окупаемости.

Примечания: 1. При отсутствии паспортных и гарантийных данных, а также наряду с ними используют для сравнения каталожные или лучшие современные данные для однотипной установки.

2. Турбинный привод встречается у мощных питательных и сетевых насосов с широкими пределами регулирования подачи.

3. Для циркуляционных насосов строят наимыгоднейший экономический график их работы (см. приложение 7-3). Такие же графики строят для питательных, сетевых теплофикационных и других групп насосов.

Экономический график работы группы насосов одного назначения строят по общему методу относительных приростов [Л. 6], применение которого в общих чертах показано в приложении 7-3.

Кривую потребного напора системы $H_c = f(Q)$ строят по разности давлений за нагнетательной задвижкой и на линии всасывания насоса при различных подачах воды во время опыта, а отдельные составляющие этого напора — по результатам измерений давлений в соответствующих точках тракта — см. п. 7, приложение 7-2 (рис. б) и приложение 7-3 (рис. а).

Точка пересечения характеристики насоса $H = f(Q)$ с линией характеристики $H_c = f(Q)$ системы (в одном масштабе) отвечает предельной подаче насоса при данных условиях, так как при большей подаче его напор меньше требуемого системой.

Одиночная работа насоса, как и параллельная работа с другими насосами на одну систему, возможна лишь тогда, когда давление в точке подключения насоса к системе ниже развиваемого им давления на линии нагнетания при холостом ходе. В противном случае вода из системы может пойти в насос в обратном направлении, повести его в разгон и повредить.

Для насосов высокого давления (питательных) должен быть обеспечен минимум подачи, при наибольшем возможном давлении в системе, во избежание закипания воды в насосе.

В отдельных случаях необходимо, чтобы характеристика $H = f(Q)$ насоса была стабильной, т. е. имела непрерывный уклон вниз от точки холостого хода.

Подробнее о насосах см. специальную литературу, например [Л. 2].

4. При неизменном числе оборотов и отсутствии кавитации характеристика $H = f(Q)$ насоса однозначна, т. е. напор и подача всегда определяют друг друга независимо от температуры воды и ее тракта до и после насоса. Удельный вес воды влияет лишь на величины ρ , G и N_c .

5. Если число оборотов насоса в опытах n отличается от паспортного n' более чем на 0,5%, то для сравнения с паспортными данными опытные значения пересчитывают по следующим формулам:

$$Q' = Q \frac{n'}{n}; \quad H' = H \left(\frac{n'}{n} \right)^2;$$

$$N'_c = N_c \left(\frac{n'}{n} \right)^3;$$

при этом считают

$$\eta'_n = \eta_n$$

и по приведенным величинам строят новые графики:

$$H' = f(Q'); \quad N'_c = f(Q'); \quad \eta'_n = f(Q').$$

6. Об изменении характеристики насоса путем изменения диаметра рабочего колеса см. [Л. 2].

7. Давление в нагнетательном патрубке насоса можно представить в следующем виде:

$$p_n = p_c + \Delta p_p - p_b,$$

где p_c — напор, необходимый для данной системы:

$$p_c = p_n + \Delta p_c + \Delta z_c;$$

p_n — напор (давление) у потребителя;
 Δp_c — потеря напора на тракте (гидравлическое сопротивление) от точки измерения величины p_b до потребителя, исключая потери Δp_p в регулирующем органе;
 Δz_c — геометрическая высота расположения потребителя над точкой измерения величины p_b .

Все величины выражаются в метрах столба перемещаемой жидкости, в кг/м^2 или кг/см^2 . Потери на изменение скорости воды вследствие их малости исключают.

8. Полезная работа насоса L состоит из двух частей:

а) работы L_1 адиабатного сжатия, расходуемой на повышение теплосодержания воды:

$$L_1 \approx 0,5P(v_b - v_n) = 0,5P \left(\frac{1}{\gamma_b} - \frac{1}{\gamma_n} \right) [\text{кг} \cdot \text{м/кг}];$$

б) работы L_2 вытеснения или перемещения воды под давлением $P = p_n - p_b$:

$$L_2 = P v_n = \frac{P}{\gamma_n} [\text{кг} \cdot \text{м/кг}].$$

Таким образом,

$$L = L_1 + L_2 = 0,5P \left(\frac{1}{\gamma_b} + \frac{1}{\gamma_n} \right) = \frac{P}{\gamma_{cp}},$$

где

$$\gamma_{cp} = \frac{2}{v_b + v_n};$$

$$P [\text{кг/м}^2]; \quad v [\text{м}^3/\text{кг}]; \quad \gamma [\text{кг/м}^3].$$

Величина L_1/L_2 практически равна относительной величине уменьшения объема воды при сжатии и для температуры от 1 до 200°С составляет около 0,5—1,0%. В большинстве случаев величиной L_1 можно пренебречь.

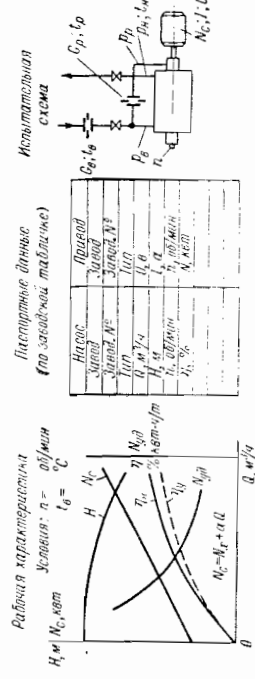
Нагрев воды в насосе происходит за счет потерь гидравлического трения.

Приложения к седьмой главе

7-1. Рабочая характеристика электронасоса.

7-2. Рабочая характеристика турбонасоса. 7-3. Пример экономического графика работы группы насосов.

Рабочая характеристика электронасоса



Результаты испытания

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номер опыта			Формула, способ определения
			1	2	...	
1	Давление нагнетания, <i>атм</i>	p_{II}				Манометр класса 0,35 » » 0,35 или ртутный Ртутный термометр » » По приложению III » » III
2	» всасывания, <i>атм</i>	$p_{в}$				
3	Температура воды на входе, °C	$t_{в}$				
4	» » выходе, °C	t_{II}				
5	Удельный вес воды на входе, $кг/м^3$	$\gamma_{в}$				
6	» » выходе, $кг/м^3$	γ_{II}				
7	Развиваемое давление, $кг/см^2$	p				$p_{II} - p_{в} \div \Delta H \gamma \cdot 10^{-4}$ *
8	Напор, <i>м</i>	H				$(p : \gamma_{cp}) 10^4$
9	Весовая подача, <i>т/ч</i>	G				Диафрагма и двухстеклоный дифманометр**
10	Подача, $м^3/ч$	Q				$(G : \gamma) \cdot 10^3$ ***
11	Полезная мощность, <i>квт</i>	N_{II}				$\frac{GH \cdot 10^3}{102 \cdot 3600}$
12	Мощность из сети, <i>квт</i>	N_c				По схеме двух ваттметров класса 0,5
13	Мощность на валу насоса, <i>квт</i>	$N_{в}$				$N_c \eta_9$
14	К. п. д. привода, %	η_9				Паспорт, каталог
15	» насоса, %	η_{II}				$N_{II} : N_{в}$
16	» установки, %	$\eta_{у}$				$N_{II} : N_c$
17	Удельный расход электроэнергии, <i>квт-ч/т</i>	$N_{уд}$				$N_c : G$
18	Число оборотов, <i>об/мин</i>	n				Ручной тахометр

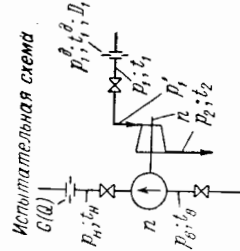
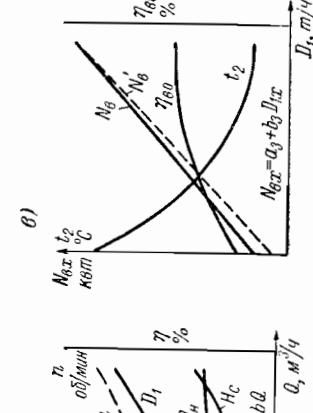
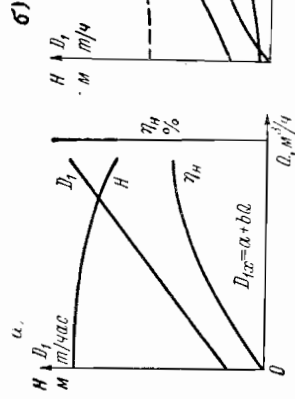
* ΔH — поправка на разность высот z точек измерения p_H и p_v и скоростных напоров;

$$\Delta H = z + \frac{c_H^2 - c_B^2}{2g} \quad (\text{для низконапорного насоса})$$

** По правилам 27-54, см. §§ 2-7.

*** γ — по месту установки диафрагмы.

Рабочая характеристика турбопососа



Результаты испытания

№ пп.	Наименование величины	Обозна- чение величины	Режим работы						Формула, способ определения
			$n \approx n_{II}$						
			1-й опыт	2-й опыт	...	1-й опыт	2-й опыт	...	

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Режим работы						Формула, способ определения
			$n \approx n_{\Pi}$						
			1-й опыт	2-й опыт	...	1-й опыт	2-й опыт	...	
5	Удельный вес воды на входе, кг/м ³	$\gamma_{\text{в}}$							По приложению III
6	Удельный вес воды на выходе, кг/м ³	$\gamma_{\text{н}}$							»
7	Развиваемое давление, кг/см ²	p							$p_{\Pi} = p_{\text{в}} + \Delta H \gamma \cdot 10^{-4} *$
8	Напор, м	H							$(p : \gamma_{\text{ср}}) \cdot 10^4$
9	Весовая подача, м ³ /ч	G							Диафрагма и двухстеклянный дифманометр **
10	Подача, м ³ /ч	Q							$(G : \gamma) \cdot 10^3 ***$
11	Полезная мощность, кат	N_{Π}							$\frac{102 \cdot 3600}{G H \cdot 10^3}$
12	Мощность на валу насоса, кат	$N_{\text{в}}$							$N \eta_{\text{м}} ****$
13	К. п. д. насоса, %	η_{Π}							$N_{\Pi} : N_{\text{в}}$
14	Число оборотов, об/мин	n							Ручной тахометр

* ΔH — поправка на разность высот z точек измерения $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{в}}$ и скоростных напоров; для низконапорного насоса

$$\Delta H = z + \frac{2g}{n} \frac{c^2 - c_v^2}{n}$$

где $c_{\text{п}}$ и $c_{\text{в}}$ — скорости на сторонах нагнетания и всасывания у насоса, м/сек.

** По правилам 27-54, см. § 2-7.

*** γ — по месту установки диафрагмы.

**** $\eta_{\text{м}}$ — механический к. п. д. турбины и редуктора; приближенно $\eta_{\text{м}}$ может быть определен из опыта холостого хода турбины с отсоединенным насосом.

N — см. п. 27; $N'_{\text{п}}$ — для опытов при $n = f(Q)$. Все опытные величины без индекса «х».

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Режим работы						Формула, способ определения
			$n \approx n_n$						
			1-й опыт	2-й опыт	...	1-й опыт	2-й опыт	...	
15	<i>Турбина</i>								Диафрагма и двухстекольный дифманометр Манометр класса 0,35 Потенциометр ЭПП-09, ХК Таблицы ВТИ, 1958 г. Манометр класса 0,35 » 0,35 или ртутный Потенциометр ЭПП-09, ХК Таблицы ВТИ, 1958 г. $i_1 - i_2$ $i - s$ диаграмма, по p_1, i_1, p_2 $i - s$ диаграмма, по p_1, i_1, p_2 ($h_0 : h_0$) · 100 ($h_n : h_0$) · 100 (D, h_n) : 0,860 См. п. 12 **** Ручной тахометр
16	Расход свежего пара, m^3/q	D_1							
17	Давление пара перед стопорным клапаном, atm	p_1							
18	Температура пара перед стопорным клапаном, °C	t_1							
19	Теплосодержание пара перед стопорным клапаном, $ккал/кг$	i_1							
20	Давление пара после дроссельного клапана, atm	p_1							
21	Давление выхлопа, atm	p_2							
22	Температура пара на выхлопе, °C	t_2							
23	Теплосодержание пара на выхлопе, $ккал/кг$	i_2							
24	Использованное теплосодержание, $ккал/кг$	h_n							
25	Располагаемое теплосодержание после стопорного клапана	h_0							
26	Коэффициент дросселирования, %	$\eta_{др}$							
27	Внутренний относительный к. п. д. проточной части (без дросселирования), %	$\eta_{во}$							
28	Внутренняя мощность турбины, $квт$	N							
29	Мощность на валу насоса, $квт$	$N_{п}$							
30	Число оборотов, $об/мин$	n							

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Режим работы						Формула, способ определения
			$n \approx n_{II}$						
			1-й опыт	2-й опыт	1-й опыт	2-й опыт	1-й опыт	2-й опыт	
	При условиях характеристики								
30	Насос ($n_x = об/мин$; $t_{вх} = ^\circ C$)	Q_x							$Q n_x : n$
31	Поддача, $м^3/ч$	H_x							$H (n_x : n)^2$
32	Напор, $м$	$N_{вх}$							$N_B (n_x : n)^3$
33	Мощность на валу, $квт$								
	Турбина ($p_{1x} = atm$; $t_{1x} = ^\circ C$; $p_{2x} = atm$)								
34	Расход свежего пара, $м^3/ч$	D_{1x}							$D_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_{1x}}} *$
35	Давление за дроссельным клапаном, $атм$	p_{1x}							$p_{1x} = p_1$
36	Располагаемое теплосодержание за дроссельным клапаном, $ккал/кг$	h_{0x}							$i - s$ диаграмма, по p_{1x}, t_{1x}, p_{2x}
37	Коэффициент дросселирования, %	$\eta_{дрx}$							$(h_{0x} : h_{0x}) \cdot 100; h_{0x}$ по p_{1x}, t_{1x}, p_{2x}
38	Внутренний относительный к. п. д. турбины (включая дросселирование), %	$\eta_{ввх}$							$(\eta_{дрx} \eta_{вв}) : 100^2$; см. п. 26
39	Использованное теплосодержание, $ккал/кг$	$h_{вх}$							$h_{0x} \eta_{по}$
40	Мощность на валу, $квт$	$N_{вх} : N_{пх}$							$(D_{1x} h_{вх} : 0,860) \eta_{н}^{****}$ (см. п. 12)
41	Теплосодержание пара на выхлопе, $ккал/кг$	i_{2x}							$i_1 - h_{вх}$
	Температура пара на выхлопе, $^\circ C$	t_{2x}							По i_{2x} и p_{2x}

* T'_{1x} по i_{1x} при $p'_{1x} = p'_1$ — см. пп. 19 и 31.

Для турбины по рис. 6:

$p_1 = \text{-----} \text{atm}; \quad t_1 = \text{-----} ^\circ\text{C};$

$p_2 =$ _____ атм; $n =$ _____ об/мин.

Для насоса:

по рис. а: $n = \text{---} \text{---} \text{---}$ об/мин; по рис. б: $n = f(Q)$;

$$t_R = \text{---}^\circ\text{C}; \quad t_R \text{---}^\circ\text{C}.$$

Паспортные данные

(по заводской табличке)

Насос	Привод
Завод _____	Завод _____
Заводский № _____	Заводский № _____
Тип _____	Тип _____
Q , м ³ /ч _____	p_1 , атм _____
H , м _____	t_1 , °C _____
n , об/мин _____	n , об/мин _____
η_H , % _____	p_2 , атм _____
	η_{BO} , % _____

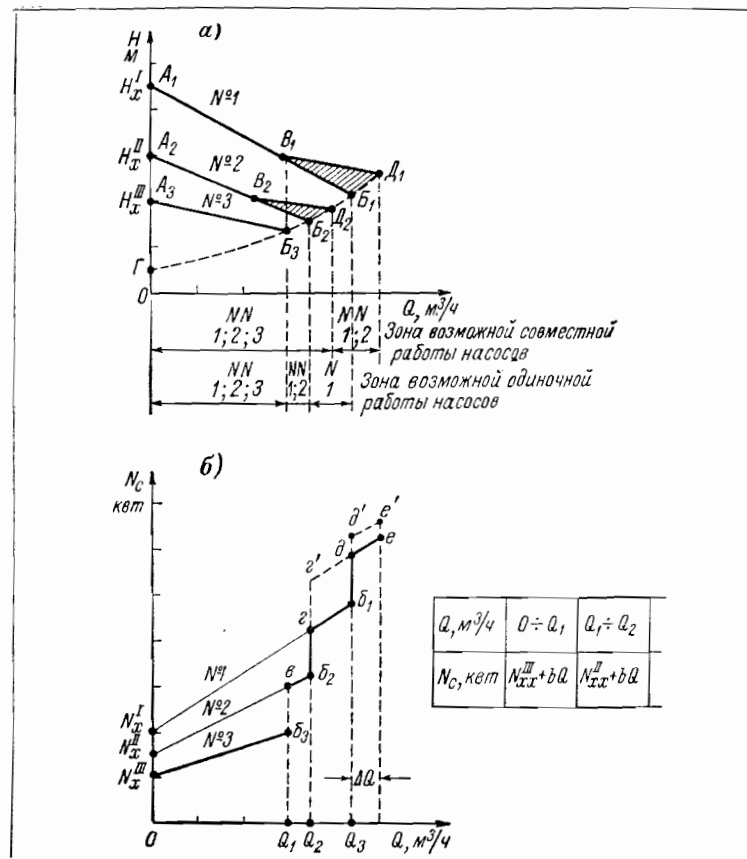
Примечание. Рисунки построены по данным следующих пунктов таблицы результатов испытания:

рис. а — пл. 13, 30 и 31; D_1 — по рис. в для значений N_B , равных N_{Bx} по п. 32 в опытах при $n \approx n_H$;

рис. 6 — пл. 8, 10 и 14; D_1 — по рис. 6 для значений N'_B , равных N'_B

по п. 28 в опытах при $n = f(Q)$;
рис. в — пп. 33, 37, 39 и 41.

Пример экономического графика работы группы насосов



П р и м е ч а н и я:

К рис. а:

1. Линия $ГД_1$ — характеристика необходимого напора насосов $H_c = f(Q)$ системы; в точке $Г$

$$H = \frac{p_{\text{H}}}{\gamma_{\text{H}}} - \frac{p_{\text{B}}}{\gamma_{\text{B}}} + \Delta H,$$

т. е. разности напоров (с учетом уровней манометров) у потребителя и на линии всасывания.

2. Линии A_1B_1 ; A_2B_2 ; A_3B_3 — характеристики $H = f(Q)$ насосов № 1, 2 и 3 по данным испытания.

3. Точка B_1 — точка пересечения горизонтали, проведенной через H'_x (напора при холостом ходе насоса № 2), с характеристикой $H = f(Q)$ насоса № 1.

4. Линия B_1D_1 построена для суммы подач насосов № 1 и 2 по их характеристикам $H = f(Q)$ при разных напорах в пределах от точки B_1 до точки пересечения с графиком $ГД_1$.

5. Линия $A_1B_1D_1$ — характеристика $H = f(Q)$ насосов № 1 и 2 при их совместной работе (при условии регулировки их общей задвижкой на линии нагнетания). Аналогично построена для насосов № 2 и 3 линия $A_2B_2D_2$.

К рис. 6:

6. Линии a_1b_1 ; a_2b_2 ; a_3b_3 — характеристики $N_c = f(Q)$ насосов № 1, 2 и 3.

7. Линия $a_3b_3b_2b_1de$ — экономический график работы насосов № 1, 2 и 3.

8. Линия b_3e — переход с насоса № 3 на насос № 2; линия b_2 — участок работы насоса № 2.

9. Линия b_2e — переход с насоса № 2 на насос № 1.

10. Линия b_1d' — переход с насоса № 1 на совместную работу насосов № 1 и 2 на участке $d'e'$ при полной нагрузке насоса № 1 (при раздельном регулировании и при неодинаковом давлении в линиях нагнетания обоих насосов; следует учесть уменьшение подачи с ростом напора по линии B_1D_1).

11. Линия b_2e' — переход с насоса № 2 на совместную работу насосов № 1 и 2 при полной нагрузке насоса № 2 [с более пологой характеристикой $N_c = f(Q)$], что в зоне ΔQ экономичнее (см. de и $d'e'$), чем по п. 10.

12. Линии b_2e' и b_1d' — мощность холостого хода насоса № 1, равная N'_x , и насоса № 2, равная N''_x .

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ НА ВАКУУМ — НА ДАВЛЕНИЕ ВЫХЛОПА

8-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Конечное давление в турбине с выхлопом в конденсатор непостоянно. Оно изменяется с изменением расхода пара в конденсатор и расхода охлаждающей воды, а также с сезонными изменениями ее температуры и по другим причинам (например загрязнение трубок и пр.).

Повышение давления в конденсаторе приводит к уменьшению мощности установки при неизменном расходе свежего пара и тепла.

Поправка к мощности на изменение давления выхлопа необходима при определении экономического в а к у у м а, т. е. при установлении наиболее экономичного режима работы циркуляционных насосов. Она нужна также для оценки экономичности работы установки в случае отклонения давления от его нормальной величины, принятой в условиях тепловой характеристики.

Наиболее достоверным является экспериментальный способ определения влияния конечного давления на мощность установки или так называемой п о п р а в к и н а в а к у у м.

Поправка на вакуум относится к неизменному расходу пара и тепла на турбину и определяется как алгебраическая сумма изменений ее мощности по двум причинам:

а) изменение использованного теплопадения в последних ступенях;

б) изменение расхода пара через последние ступени вследствие изменений температуры конденсата после конденсатора и расхода пара из отбора на первый по ходу конденсата подогреватель (№ 1).

Оставляя в работе только первый подогреватель и под- держивая во время опыта постоянный расход свеже- го пара, обеспечивают постоянный расход тепла на уста- новку, поскольку давление в камере отбора на подо- греватель и температура конденсата на выходе из него при изменениях вакуума в конденсаторе на несколько про- центов сохраняются практически неизменными.

Одновременно получают суммарные изменения мощ- ности турбины по указанным двум причинам.

В чисто конденсационной турбине (т. е. без регенера- ции) с уменьшением давления в конденсаторе и соответст- венным повышением температуры конденсата i_k расход тепла на установку Q_1 при неизменном расходе свежего пара D_1 возрастает, что видно из выражения

$$Q_1 = D (i_1 - i_k).$$

Следовательно, в данном случае для соблюдения постоян- ного расхода тепла с понижением давления в конденсате нужно уменьшить расход свежего пара, а с ним умень- шится и мощность турбины, что в общем уменьшает по- правку к мощности в большей мере, чем при наличии регенерации, и должно быть учтено дополнительно.

Полагая мощность турбины пропорциональной расходу тепла, определяем поправку на вакуум в данном случае из выражения:

$$\Delta N'_{p_2} \approx \Delta N_{p_2} - N_3 \frac{\Delta i_k}{i_1 - i_k},$$

где ΔN_{p_2} — изменение мощности турбины (со знаком плюс) вследствие понижения давления p_2 в conden- саторе;

N_3 — мощность турбины до понижения давления p_2 ;
 i_1 и i_k — теплосодержание свежего пара и конденсата до понижения давления p_2 ;

Δi_k — понижение теплосодержания конденсата вследствие понижения давления p_2 .

В целях достижения наиболее глубокого вакуума испы- тание проводят преимущественно при самой низкой тем- пературе охлаждающей воды, т. е. в зимнее время.

Во время испытания необходимо обеспечить точное измерение мощности и постоянство всех величин (кроме вакуума), влияющих на мощность, т. е. на расход пара и на использованное теплопадение, например давления и температуры свежего пара.

8-2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЖИМ ОПЫТОВ

Испытание состоит из трех серий опытов при расходах пара в конденсатор в долях от максимального 0,2; 0,5; 1,0. Во время испытания должны быть выполнены следую- щие условия:

а) отключение всех отборов пара, кроме отбора на первый по ходу конденсата подогреватель, а также посторонних подводов пара в тепловую схему установки;

б) односторонний упор сервомотора паровпускных кла- панов против увеличения нагрузки в данной серии опы- тов;

в) поддержание давления и температуры пара перед стопорным клапаном неизменными с колебаниями давлени- я не более $\pm 0,5\%$ и температуры $\pm 5^\circ \text{C}$;

г) изменение давления в конденсаторе от минимально достижимого до $\sim 0,1 \text{ ата}$ и обратно ступенями в $0,01 \text{ ата}$ путем изменения расхода охлаждающей воды, впуска воздуха или прикрытия задвижки на отсосе воздуха перед эжектором.

Продолжительность каждой ступени опыта составляет 5—10 мин при устойчивом давлении в конденсаторе (откло- нения до $\pm 0,003 \text{ ата}$ или 2 мм рт. ст.).

8-3. ИЗМЕРЕНИЯ

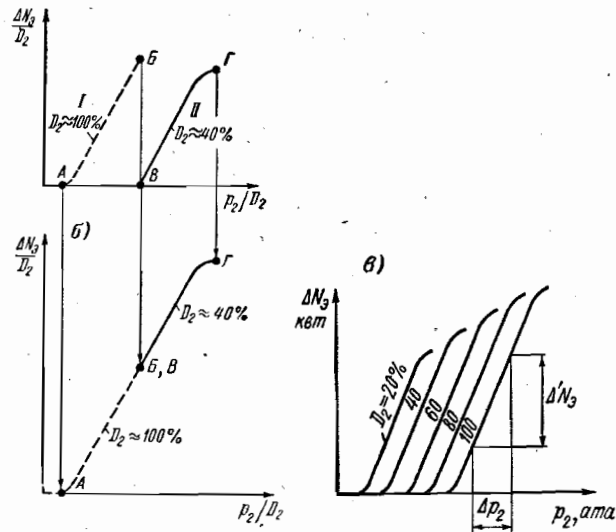
Наименование измеряемых величин и способ их изме- рения приведены в табл. 8-1.

Таблица 8-1

№ пп.	Измеряемая величина	Способ измерения, измерительный прибор
1	Мощность на зажимах ге- нератора	По схеме двух ваттметров с приборами класса 0,5
2	Давление в конденсаторе	Два—четыре (справа и слева) ртутных манометра с нониусом и проверенный эксплуата- ционный прибор
3	Давление в контрольной ступени	Ртутный манометр
4	Расход свежего пара	Проверенный эксплуатацион- ный прибор
5	Температура свежего пара	То же
6	Давление пара перед сто- порным клапаном	Манометр класса 0,35
7	Расход конденсата из кон- денсатора	Проверенный эксплуатацион- ный прибор

Поправка на вакуум — на давление выхлопа

Результаты испытания



№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Серия опытов				Формула, способ опреде- ления	
				I			II		
				1-й опыт	..		1-й опыт		..
1	Давление вы- хлопа	p_2	ата					Измере- ние	
2	Давление в контрольной	p^K	»					То же	
3	ступени . . .								
4	Давление свежего пара	p_1	»					»	
5	Температура свежего пара	t_1	°C					»	
6	Расход пара в конденсатор	D_2	т/ч					Измере- ние, см. приложе- ние 9-1, прим. 1	
6	Мощность	N_3	квт					Измере- ние	

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Серия опытов				Формула, способ опреде- ления	
				I			II		
				1-й опыт	•	•	1-й опыт		•
7	Приведенная мощность ¹	N'_3	квт						
8	Изменение мощности ²	$\Delta N'_3$	»						
9	Удельное из- менение мощ- ности	$\Delta N'_3 / D_{2cp}$	квт/м/ч						
10	Удельное да- вление выхлопа	$p_{2пр} / D_{2cp}$	ата/м/ч						

$$^1 N'_3 = N_3 \frac{D_{2\text{ср}}}{D_2} \cdot \frac{h_0 \text{ пр}}{h_0} = N_3 \frac{p_{\text{ср}}^k}{p^k} \cdot \frac{h_0 \text{ пр}}{h_0},$$

где $D_{2\text{ср}}$ и $p_{\text{ср}}^k$ — округленные средние значения D_2 и p^k для данной серии опытов;

h_0 — располагаемое теплопадение в данном опыте от p_1 и t_1 до p_2 ;

$h_0 \text{ пр}$ — то же, от округленных средних для данной серии опытов значений $p_{1\text{ср}}$ и $t_{1\text{ср}}$ до $p_{2\text{пр}}$ для данного опыта;

$$p_{2\text{пр}} = p_2 \frac{p_{\text{ср}}^k}{p^k}.$$

² $\Delta N'_3 = N'_3 - N'_{30}$, где $N'_{30} = N'_3$ в опыте при наименьшем значении p_2 для данной серии.

Примечания:

1. Кривые AB и $B\Gamma$ на рис. а построены по данным пп. 9 и 10 таблицы результатов испытания.

2. «Универсальная» кривая поправок на рис. б построена по графикам AB и $B\Gamma$ рис. а путем наложения точки B на точку B .

3. Кривые рис. в построены по произвольным точкам графика рис. б путем умножения их координат на произвольные значения D_2 , указанные на рис. в в процентах от максимального допустимого расхода пара в конденсатор;

$$\Delta' N_{p_2} = - \frac{\Delta N_3}{\Delta p_2} [\text{квт/ата}].$$

4. При заданном нормальном значении $p_{2н} = \text{const}$ поправка на вакуум непосредственно по универсальной кривой определяется из выражения

$$\Delta N_{p_2} = \frac{\Delta N_3}{D_2} D_{2\text{оп}} [\text{квт}],$$

где $\frac{\Delta N_3}{D_2}$ — по кривой для значения $\left(\frac{p_2}{D_2}\right)_{\text{оп}}$ при условии, что нуль

шкалы $\frac{\Delta N_3}{D_2}$ отвечает величине $\frac{p_2}{D_2} = \frac{p_{2н}}{D_{2\text{оп}}}$.

В качестве контрольной служит любая ступень (до камеры отбора на первый по ходу конденсата подогреватель), где давление можно измерить наиболее точным — ртутным манометром (до 2,5 *ата*), чтобы по нему определять изменения расхода пара через последние ступени турбины. Запись величин — одновременная, по сигналу через одну минуту.

8-4. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Значения мощности в опытах каждой серии путем пересчета и поправок приводят к одному — округленному среднему для данной серии значению давления и температуры свежего пара, а также расхода пара в конденсатор (в том числе в подогреватель № 1), который считают пропорциональным давлению в контрольной ступени (влиянием изменений температуры пара в контрольной ступени пренебрегают).

Методы подсчетов и построения графиков поправки на вакуум, в том числе так называемой «универсальной» кривой, показаны в приложении 8-1, см. [Л. 29].

В заключение по результатам испытания отмечают следующее.

1. Предельное давление (или предельный вакуум) на входе пара в конденсатор достигается при отношении давления к расходу пара $\frac{p_2}{D_2} = \dots \text{ ата} \cdot \text{ч}/\text{т}$ и составляет:

$$p_2 = \dots \text{ ата} \text{ при } D_2 = \dots \text{ т/ч } (\sim 0,4 D_{2 \text{ макс}});$$

$$p_2 = \dots \text{ » } D_2 = \dots \text{ » } (D_{2 \text{ макс}}).$$

2. Изменение мощности установки с изменением давления в конденсаторе (поправка на вакуум) практически равно нулю при отношениях $\frac{p_2}{D_2} < \dots$, а при отношениях $\frac{p_2}{D_2} = \dots \div \dots$ постоянно и составляет $\pm \dots \text{ квт} / \pm 0,01 \text{ ата}$.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

9-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Определение экономического вакуума имеет весьма важное значение для эксплуатации, так как позволяет вести наиболее экономичный режим работы циркуляционных насосов и правильно распределить расход охлаждающей воды при параллельном водоснабжении нескольких турбин в зависимости от паровой нагрузки конденсаторов и температуры охлаждающей воды.

Вакуум или давление в конденсаторе при данных условиях называют экономическим — наивыгоднейшим, если мощность установки, за вычетом расхода мощности на подачу охлаждающей воды, не может быть увеличена путем изменения режима подачи или расхода воды.

Экономический вакуум установки зависит от исправности конденсационного устройства (включая циркуляционные насосы), от паровой (тепловой) нагрузки конденсатора и от температуры охлаждающей воды.

Значения экономического вакуума определяют экспериментальным путем для различной температуры охлаждающей воды: 0—2; 8—10; 14—16 и 20—22° С в зависимости от климатических условий местности.

Для других температур воды пользуются методом интерполяции опытных данных.

Испытания сводятся к определению зависимости вакуума от расхода охлаждающей воды при различных постоянных значениях расхода пара в конденсатор и неизменной начальной температуре охлаждающей воды.

Опыты по определению экономического вакуума можно использовать и для определения поправки на вакуум, при условии точного измерения мощности генератора и других величин (см. гл. 8).

9-2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЖИМ ОПЫТОВ

1. Испытание по определению экономического вакуума при одной температуре охлаждающей воды состоит из пяти серий опытов при расходах пара в конденсатор в долях от полного: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

В одной серии производят шесть опытов при различном расходе охлаждающей воды, который изменяют ступенями от максимума до минимума (или наоборот).

Ступени расхода воды и его минимум определяются необходимыми для опытов ступенями давления в конденсаторе: приблизительно на 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,03 *атм* выше наименьшего значения, достижимого во время испытания при максимальном расходе охлаждающей воды.

2. Расход воды изменяют посредством напорных и сливных задвижек у конденсатора данной турбины и путем изменения числа действующих циркуляционных насосов; при необходимости сокращают расход на другие турбины, питаемые от общего коллектора.

Давление воды перед конденсатором не превышает допустимой величины (1 *атм*), а разрежение на сливах — 400 мм рт. ст.

3. Для постоянства расхода пара в конденсатор сервомотор ч. в. д. ставят на упор против увеличения нагрузки, а регулируемые отборы пара (по необходимости и нерегулируемые отборы) отключают; давление свежего пара перед стопорным клапаном поддерживают постоянным с отклонениями $\pm 0,5\%$.

4. Конденсатор, эжектор, циркуляционные насосы исправны; протечка сырой воды в паровое пространство конденсатора меньше 0,5% расхода пара при полной нагрузке; количество удаляемого воздуха — не более $2 + 0,01 D_n^k$ [кг/ч]; давление пара перед соплами эжектора — *атм* имеет нормальное значение; рабочие поверхности конденсатора и холодильника эжектора чистые. Поступление посторонних неучтенных потоков пара и воды в конденсатор исключено.

Опыт начинают при установившейся и одинаковой до $\pm 0,5^\circ\text{C}$ температуре охлаждающей воды на сливах. Продолжительность опыта составляет 10—15 мин, а общая продолжительность опытов — до 16 час.

9-3. ИЗМЕРЕНИЯ

Наименование измеряемых величин и способ их измерения приведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

№ пп.	Измеряемая величина	Способ измерения, измерительный прибор
1	Мощность на зажимах генератора	Проверенный эксплуатационный ваттметр
2	Расход конденсата из конденсатора	Диафрагма и двухстекольный дифманометр
3	Давление в конденсаторе	Два ртутных манометра с нулем, присоединенных к тем же точкам забора, что и в опытах по определению поправки на вакуум (см. гл. 8)
4	Температура конденсата на выходе из конденсатора	Ртутный термометр
5	Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор	Ртутный термометр с ценой деления шкалы $0,1^\circ\text{C}$
6	То же, на выходе из конденсатора (справа, слева, общая)	То же
7	Расход охлаждающей воды через конденсатор	Из уравнения теплового баланса конденсатора
8	Расход воздуха, отсасываемого эжектором	Диафрагма на выходе паровоздушной смеси из эжектора

Кроме того, подлежат измерению:

а) неустраняемые потоки воды в паровое пространство конденсатора, в том числе дренаж из эжектора, из подогревателя № 1, расход которых вычитают из измеренного расхода конденсата; их теплом можно пренебречь;

б) расход электроэнергии на насосы охлаждающей воды по схеме двух ваттметров с приборами класса 0,5;

в) давление пара перед соплами эжектора, давление охлаждающей воды на входе и на выходе (на сливах) у конденсатора, параметры свежего пара.

Запись величин производят одновременно по сигналу (или по часам) через одну минуту.

Во время проведения испытаний комбинация включенных циркуляционных насосов, обслуживающих данную установку, может иметь случайный характер. Поэтому расход электроэнергии на циркуляционные насосы в зависимости от расхода охлаждающей воды должен определяться по экономическому графику их работы, построенному по экспериментальным данным, о чем сказано выше.

Методы определения расхода пара и охлаждающей воды в конденсатор, а также пример построения графиков экономического вакуума для данной установки показаны в приложении 9-1.

График, изображенный сплошной линией на рис. 6 приложения 9-1, представляет не только наивыгоднейший режим работы циркуляционных насосов в зависимости от паровой нагрузки конденсатора, но позволяет решить вопрос об экономической целесообразности того или иного отступления от данного режима в условиях эксплуатации, пользуясь кривой зависимости вакуума от расхода охлаждающей воды при данной ее температуре. Кроме того, эти графики служат для технического нормирования величины вакуума как одного из технико-экономических показателей работы установки.

Имея графики экономического вакуума для различных температур охлаждающей воды, их совмещают на одном рис. 6 приложения 9-1.

При ухудшенном состоянии установки экономическое давление в конденсаторе выше, чем при исправном ее состоянии; в эксплуатации его определяют путем пробного изменения режима подачи охлаждающей воды при данных условиях и сравнения полученных величин $\Delta N_{цэн}$ и $\Delta N_{р_2}$ (см. приложение 9-1).

Расход пара в конденсатор D_2 определяют по расходу конденсата из него (при отсутствии рециркуляции) или по давлению в контрольной ступени турбины с применением соответствующего множителя, полученного опытными путем.

Расход охлаждающей воды можно определять из выражения

$$W = D_2 \frac{530}{\Delta t_{в}},$$

где

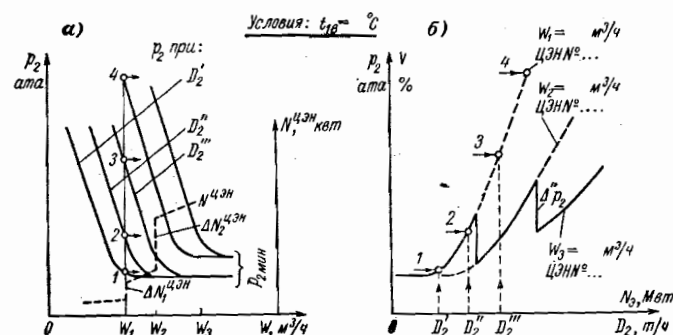
$$\Delta t_{в} = t_{в2ср} - t_{в1},$$

на основании которого может быть построен соответствующий график

$$W = f(D_2; \Delta t_{в}).$$

При параллельном водоснабжении нескольких турбин из общего коллектора определение экономического вакуума для одной отдельной турбины сложнее рассматри-

График экономического вакуума установки



Результаты испытания

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Серия опытов						Формула, способ определения
				I				II		
				1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	...	...		
1	Расход пара в конденсатор ¹	D_2	т/ч							Измерение
2	Мощность на зажимах генератора	$N_{\text{э}}$	Мвт							
3	Давление в конденсаторе	p_2	атм							То же
4	Расход охлаждающей воды ²	W	м³/ч							
5	Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор	$t_{в1}$	°C							Измерение
6	То же, на выходе	$t_{в2}$	°C							
7	Расход электроэнергии на циркуляционные электронасосы (ЦЭН)	$N_{\text{ЦЭН}}$	квт							»
8	В работе ЦЭН №	—	—							

¹ $D_2 = G_K - \Delta G$, где G_K — средний для данной серии опытов расход конденсата из конденсатора; ΔG — расход в конденсатор дренажа из эжектора, из подогревателя № 1 и др.

² $W = \frac{D_2 \Delta t_2 + \Delta Q}{t_{в2} - t_{в1}}$, где Δt_2 — теплоотдача 1 кг пара в конденсаторе по результатам теплового испытания установки при данном режиме нагрузки; ΔQ — тепло, отдаваемое в конденсаторе дренажом и другими потоками воды.

Примечания:

К рис. а:

1. Графики $p_2 = f(D_2; W)$ построены по данным таблицы результатов испытания.

2. График $N_{цэн} = f(W)$ построен по экономическому графику работы циркуляционных насосов — см. приложение 7-3 и гл. 9.

К рис. б:

3. Графики построены по величинам p_2, D_2 (рис. а) для значений расхода воды $W = W_1; W_2; W_3$ на уступах $N_{цэн} = f(W)$, соответствующих пуску очередного насоса.

4. Момент перехода с W_1 на W_2 по рис. б определяется величиной уступа давления в конденсаторе $\Delta'p_2$ (между соответственными кривыми $W = \text{const}$), равной: $\Delta'p_2 = \Delta N_{цэн} / \Delta'N_{p_2} [амв]$, что отвечает условию равенства приростов мощности: турбины — за счет уменьшения давления в конденсаторе на величину $\Delta'p_2$ и включенных циркуляционных насосов — за счет увеличения расхода циркуляционной воды $\Delta N_{цэн} = \Delta'N_{p_2} \Delta'p_2$, где $\Delta N_{цэн}$ — прирост мощности на уступе графика $N_{цэн}$; $\Delta'N_{p_2}$ — поправка на давление p_2 — прирост мощности турбины, $\mp амв / \pm амв$. Также определяется $\Delta'p_2$.

5. Режим с неполной загрузкой действующих ЦЭН, т. е. между уступами графика $N_{цэн}$, может оказаться экономически выгодным лишь на участках, где $p_2 \approx p_{2мин}$, т. е. когда по рис. а сокращение расхода воды ΔW вызывает незначительное увеличение давления Δp_2 при данном расходе пара в конденсатор. Необходимое условие определяется выражением

$$\Delta p_2 \Delta'N_{p_2} < \Delta N_{цэн},$$

где

$$\Delta N_{цэн} = b \Delta W, \text{ или } \frac{\Delta p_2}{\Delta W} < \frac{b}{\Delta'N_{p_2}};$$

здесь b — относительный прирост мощности действующего ЦЭН, $квт \cdot ч / м^3$ (см. приложения 7-1 и 7-3);

$\frac{\Delta p_2}{\Delta W}$ — определяется по рис. а.

6. $N_э$ — мощность, отвечающая расходу пара в конденсатор D_2 при заданных условиях (для установки без регулируемых отборов пара).

ваемого здесь случая и может быть выполнено лишь при известных допущениях, в частности по распределению циркуляционной воды между турбинами. Тогда графики следует составлять для группы действующих турбин при различном их числе и различных сочетаниях, для определенных узких пределов температуры циркуляционной воды.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ТЕПЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

10-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На ряде электростанций действуют старые установки отечественного и зарубежного изготовления, которые не имеют ни типовых, ни даже заводских характеристик и должны быть испытаны в реальных условиях их работы. Кроме того, всякую паротурбинную установку в целях правильной эксплуатации, своевременного выявления недостатков в ее работе, усовершенствования путем реконструкции или модернизации на основе современной техники и местных требований — следует подвергать периодическому проверочному испытанию (после монтажа, ревизии, реконструкции, через определенный срок работы и перед остановкой на ревизию).

Указанные испытания должны выполнять местные группы наладки по методу более простому, чем рассмотренное выше полное тепловое испытание, так как численный состав групп и их оснащение измерительными средствами ограничены.

Как указывалось ранее, проведение теплового испытания при условиях, весьма близких к условиям характеристики, значительно упрощает обработку данных испытания, одновременно способствуя повышению точности его окончательного результата.

Поддержание постоянства основных параметров теплового процесса: давления и температуры свежего пара, расхода питательной воды и давления выхлопа, при неизменном открытии парораспределения, обеспечивает практическое постоянство всего процесса, включая систему регенерации. Естественно, что измерения постоянных во время

опыта величин и их обработка проще и точнее, чем при их значительных колебаниях.

Достижение указанного постоянства заданных условий работы установки во время опытов практически возможно, если принять соответствующие меры.

Так, для достижения постоянного расхода свежего пара и его давления перед стопорным клапаном необходимо поставить специального регулировщика у главной паровой задвижки, при помощи которой он обязан по установленному перед ним точному манометру (с учетом поправок) непрерывно поддерживать заданное постоянное давление пара перед стопорным клапаном турбины.

Еще лучше производить регулировку давления перед стопорным клапаном задвижкой, расположенной до измерительной паровой диафрагмы (сопла). В этом случае колебания давления пара в котельной не будут влиять на показания расходомера (дифманометра); они будут постоянны, если не считать влияния колебаний температуры свежего пара.

Труд регулировщика облегчается при наличии электропривода у задвижек.

В период всего испытания, для возможности регулирования, давление в котельной должно поддерживаться на 2—5 атм выше давления перед стопорным клапаном турбины.

Таким же образом другой регулировщик поддерживает постоянство расхода питательной воды по расположенному перед ним расходомеру или дифманометру.

В ряде случаев расход питательной воды во время опыта не подвержен заметным изменениям, и тогда можно ограничиться лишь обеспечением заданного расхода воды в начале опыта, ведя непрерывное наблюдение за ним в течение опыта.

Необходимое давление выхлопа во время опыта обычно сохраняется неизменным и в начале опыта при выхлопе в конденсатор легко достигается путем изменения расхода охлаждающей воды. При испытании установки в целом нет необходимости сохранять расход охлаждающей воды на конденсатор неизменным. Тепловую характеристику конденсатора легко получить из серии специальных опытов.

Сравнительно труднее бывает поддерживать постоянный расход пара регулируемых отборов, а также постоян-

ную температуру свежего пара, однако и здесь следует наметить возможные по местным условиям средства — согласование с потребителями, сжигание определенного вида или качества топлива, включение или отключение отдельных котлов и т. п.

Кроме того, следует поддерживать постоянным $\cos \varphi$ генератора и строго соблюдать предусмотренную условиями тепловой характеристики тепловую схему установки.

Таким путем удается достигнуть меньших отклонений от условий характеристики, чем допускаемые существующими нормами (см. стр. 165) и практикой испытаний.

Отклонения могут составить:

$$\begin{aligned}\delta p_1 &\leq \pm 0,5\%; & \delta t_1 &\leq \pm 5^\circ \text{C}; \\ \delta G_{\text{пит}} &\leq \pm 2\%; & \delta p_2 &\leq \pm 2\%; \quad \delta \cos \varphi \leq \\ & & &\leq \pm 2\%.\end{aligned}$$

Если в этом случае для условий характеристики конденсационной турбины принять опытные величины мощности и расхода пара, а расход питательной воды равным расходу свежего пара (по условиям характеристики), то ошибка в наиболее важном показателе — удельном расходе тепла — за счет такого допущения составит не более $\pm 0,5\%$. Если же к полученной его величине внести простейшие поправки, то эта погрешность будет не более $\pm 0,1\%$ — по величине погрешности самих поправок, которая в среднем едва ли больше $\pm 20\%$ их истинного значения.

Для турбины типа ВК-50, например, средние расчетные значения поправок можно считать равными:

$$+0,06\% \text{ на } +1\% \text{ отклонения } p_{1\text{оп}} \text{ от } p_{1\text{x}} \text{ (т. е. } \frac{p_{1\text{оп}} - p_{1\text{x}}}{p_{1\text{x}}} \cdot 100);$$

$+0,02\%$ на $+1^\circ \text{C}$ отклонения $t_{1\text{оп}}$ от $t_{1\text{x}}$ (с учетом изменения начального теплосодержания и конечной влажности пара);

$$-0,1\% \text{ на } +1\% \text{ отклонения } G_{\text{пит}} \text{ от } D_1.$$

Отклонение p_2 оценивают с учетом экспериментального значения данной поправки, составляющей около $\pm 1\%$ номинальной мощности на каждую $\pm 0,01 \text{ ата}$ — для турбин с конденсатором.

Дальнейшее упрощение метода теплового испытания паротурбинной установки состоит в раздельном, неодновременном испытании ее элементов — парораспределения, проточной части, регенеративной системы, конденсационного устройства. Наряду с этим проводят испытание установки в целом для определения лишь величин удельных расходов пара и тепла.

По сравнению с рассмотренным выше полным испытанием такой метод имеет следующие преимущества:

а) менее сложные условия испытания, определяемые условиями характеристики только испытываемого элемента установки и потому сравнительно легко выполнимые;

б) меньшее число наблюдателей и приборов — по числу одновременно измеряемых величин;

в) сокращенная обработка опытных величин; исключается подсчет балансов тепла и приведение опытных величин к условиям характеристики, что особенно уместно для установок, уже имеющих полные тепловые характеристики — типовые или по данным ранее проведенных испытаний, из которых, в частности, известны величины регенеративных отборов пара.

По объему и точности получаемые характеристики могут быть такими же, как и при полном тепловом испытании установки.

10-2. ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ТЕПЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ ПО УПРОЩЕННОМУ МЕТОДУ

Программа теплового испытания установки по упрощенному методу (см. также приложение 3-1) имеет следующее примерное содержание:

1. Цель испытания

Целью испытания может служить: снятие или проверка тепловых характеристик установки и ее основных элементов; выявление недостатков, понижающих экономичность ее работы; проверка правильности эксплуатационных технико-экономических показателей; анализ и оценка работы установки, выдача рекомендаций по ее улучшению; определение эффективности проведенных мероприятий, или срока и объема необходимого ремонта.

2. Условия проведения и режим опытов

Условиями проведения испытания являются: установившееся тепловое состояние установки; постоянство измеряемых величин; упор парораспределения (способом, согласованным с заводом-изготовителем или с компетентной организацией); соблюдение тех из общих условий тепловой характеристики установки, которые существенно влияют на экономичность работы испытываемого элемента, на его характеристику. О выборе условий характеристики см. стр. 164, а также приложение 3-8.

В опытах по определению величин удельных расходов пара и тепла требуется соблюдение всех условий тепловой характеристики установки.

Режим нагрузки зависит от системы парораспределения и формы тепловой характеристики элемента установки (см. стр. 166).

Если испытание имеет целью лишь проверку работы установки, уже имеющей тепловые характеристики (типовые или другие), то следует выбрать три-четыре характерных по длительности режима нагрузки, включая максимальную и экономическую (в точках изломов характеристики).

Испытание проточной части при влажном паре на выхлопе следует производить с отключенными отборами пара. При этом наиболее просто и точно из баланса мощности установки определяется величина диаграммного внутреннего относительного к. п. д. — важнейший показатель экономичности проточной части, по которому можно сравнивать ряд последовательных ее испытаний.

Один из этих опытов надо провести с полным открытием парораспределения при сниженном давлении пара перед стопорным клапаном, для уменьшения влияния дросселирования пара перед входом в проточную часть, которое в разных испытаниях может оказаться различным.

Если не организовано измерение температуры пара в самой проточной части, к. п. д. первых ее отсеков с перегретым паром на выходе можно приблизительно определить в опытах с включенной регенерацией — при испытании подогревателей.

Условия проведения испытания отдельных элементов установки перечислены в приложении 10-1 (разделы А —

Г) и, как сказано выше, ограничиваются условиями их характеристики.

В случае установок с регулируемыми отборами для получения характеристики по расходу пара можно рекомендовать проведение следующих опытов:

1. Четыре-пять опытов в рабочей зоне расходов свежего пара при минимальном пропуске пара в ч. с. д. (ч. н. д. при одном регулируемом отборе пара). При этом непосредственно получают характеристику ч. в. д., т. е. линию AB (см. рис. 1-40 и 1-41) с приближенным угловым коэффициентом $a^{ч.в.д.}$.

Условия опытов: p_1 , t_1 , p_n (т), p_2 , напряжение U и $\cos \varphi$, близкие к условиям характеристики.

2. Четыре-пять опытов без регулируемых отборов пара — для непосредственного получения характеристики установки при данном режиме, т. е. линии AD (см. рис. 1-40 и 1-41) с приближенным угловым коэффициентом a .

Условия опытов: p_1 , t_1 , p_n , p_2 , U , $\cos \varphi$, близкие к условиям характеристики.

3. Шесть-семь опытов при неизменном расходе свежего пара и с переменным регулируемым отбором пара (только вторым — для установки с двумя отборами). При этом непосредственно получается характеристика ч. в. д.: или линия PP (см. рис. 1-41) с приближительным угловым коэффициентом B (см. стр. 275); мощность ч. н. д. определяется из уравнения баланса мощности установки (см. стр. 169).

Условия опытов: p_1 , t_1 , p_n , p_2 , U , $\cos \varphi$, близкие к условиям характеристики.

Все отборы из ч. в. д. и ч. с. д. отключены. Давление в камере промышленного отбора (для турбины с двумя отборами) максимально допустимое, при полном открытии парораспределения ч. с. д. Парораспределение ч. в. д. на упоре во всех опытах, а его открытие определяется условием по давлению в камере промышленного отбора, или для турбины с одним отбором — по максимально допустимому расходу пара в ч. н. д.

Из общего числа опытов следует провести один-два опыта при минимальном расходе пара в ч. н. д. и два опыта при полностью открытом парораспределении ч. н. д. и давлении пара в камере отбора перед ч. н. д. выше принятого для характеристики.

Во всех опытах тепловая схема установки должна отвечать условиям характеристики, в частности для каждой проточной части $G_{к.пит} \approx D_1$.

Продолжительность опытов при испытании отдельных элементов установки, например парораспределения, регенеративной системы, можно ограничить тридцатью минутами.

Опыты по определению характеристики всей установки следует проводить в течение 1—2 час.

Указания по подготовке и проведению испытания см. в гл. 3 и 4.

В зависимости от местных условий объем подготовительных работ можно сократить.

При невозможности измерить расход пара на деаэра-тор его следует отключить и величину расхода пара учесть расчетным путем.

3. Измерения

Измерению подлежат величины, необходимые для тепловой характеристики испытываемого элемента установки (см. приложение 10-1, разделы А — Г, а также § 1-3 и 1-4).

При испытании установки с регулируемыми отборами пара измеряют все величины, указанные в приложении 10-1 (раздел Б), давления, температуры и расходы пара регулируемых отборов, расход конденсата из конденсатора и другие величины по приложению 10-1 (раздел Д).

Измерения производят в соответствии с требованиями, перечисленными во второй главе.

Величины, имеющие для испытываемого элемента второстепенное значение, измеряют проверенными эксплуатационными приборами, с учетом необходимых поправок, например: на высоту расположения манометра над точкой забора давления, на температуру и давление потока при измерении расхода, поправки по паспорту или по протоколу тарировки.

Для правильного измерения температуры пара в камерах отборов, независимо от его расхода в отборы, желательно иметь по четыре-шесть термопар, заложенных по окружности потока в самих камерах — в проточной

части, и исключить влияние посторонних потоков (пара из уплотнений и др.).

Использование проверенных суммирующих и самопишущих приборов (электросчетчиков, расходомеров, потенциометров) класса 0,2—0,5 или более низкого класса, но с дублированием их точными указывающими приборами (для периодической сверки), позволяет еще более сократить число наблюдателей и облегчить обработку опытных данных.

Весьма важно производить тарировку диафрагмы на конденсате по мерному баку, для чего должна быть смонтирована простейшая схема (см. стр. 146), которая может служить для испытания различных установок на одной станции.

Тарировка не только понижает погрешность, но и повышает надежность измерения расхода, позволяя выявить и исключить ряд ошибок, возможных по различным причинам.

10-3. ОТЧЕТ ОБ ИСПЫТАНИИ

Составление отчета об испытании заключается в подсчете средне-арифметических значений измеряемых величин за опыт, введении к ним необходимых поправок, определении величин, измеряемых косвенным путем, — тепло-содержаний, расходов, и составлении заключения по результатам испытания.

Показатели экономичности отдельных элементов установки можно определять непосредственно из опытных величин без всякого их пересчета.

В опытные значения удельного расхода пара, тепла или удельной теплофикационной выработки электроэнергии можно внести поправки на отклонение опытных значений важнейших параметров от их значений по условиям, принятым для составляемой характеристики. Об этих поправках см. стр. 287, причем, учитывая малую величину отклонений, следует по возможности пользоваться имеющимися готовыми поправками.

Указания по составлению отчета об испытании см. § 5-6. Для отчета могут быть использованы формы приложений 5-1 и 5-10, а также специальные формы приложения 10-1 (разделы А — Е), где указаны измеряемые величины, показатели экономичности и условия испытания, а также метод

приведения опытных значений расхода пара и тепла к условиям характеристики для конденсационной турбины без регулируемых отборов пара; второстепенные величины отмечены звездочкой.

По полученным данным строят тепловые характеристики согласно приложению 3-8.

По данным опытов пп. 1, 2, 3 (см. стр. 384) можно построить не только граничные линии $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}} = \text{const}$, $D_{\text{п}} = 0$ и $D_{\text{т мин}}$ (линии АБ, АД и ПР по рис. 1-41), но и полную приближенную диаграмму режимов по расходу пара.

Так, например, для установки с двумя регулируемым отборами пара по данным опытов пп. 1 и 2 строят вспомогательные диаграммы $D_{\text{п}} = f(D_1)$ при $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}} = \text{const}$ и $D_2^{\text{ч.с.д}} = f(D_1)$ при $D_{\text{п}} = 0$ и величине $D_{\text{т}} = 0$. Пользуясь этими диаграммами, на линиях $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}} = \text{const}$ (АБ) и $D_{\text{п}} = 0$ (АД) откладывают значения $D_{\text{п}} = 0, 10, 20 \dots \text{т/ч}$ и $D_2^{\text{ч.с.д}} = 10, 20 \dots \text{т/ч}$, через которые проводят прямые, параллельные линиям $D_{\text{п}} = 0$ (АД) и прямые, параллельные (в зоне равных значений D_1) линии $D_{2\text{мин}}^{\text{ч.с.д}} = \text{const}$ (АБ). Линии продолжают до пересечения с граничными линиями $D_{1\text{макс}} = \text{const}$ и $N'_{\text{э макс}} = \text{const}$ (N'_3 — см. стр. 80).

При проведении опытов по п. 2 необходимо обеспечить возможность определения величины $D_2^{\text{ч.с.д}}$, что позволит построить в нижней части диаграммы режимов линию предельных значений теплофикационного отбора (линию ТСП по рис. 1-41).

О построении нижней части диаграммы режимов см. стр. 273.

Представленный в основных чертах упрощенный метод тепловых испытаний паротурбинных установок может быть развит в процессе его применения.

Группа наладки в составе двух-трех человек с помощью этого метода и при наличии сравнительно небольшого парка лабораторных приборов в состоянии получить необходимые данные для правильной оценки экономичности работы установки и ее основных элементов и на этом основании содействовать улучшению технико-экономических показателей электростанции в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ УПРОЩЕННОГО ТЕПЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ
ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

А. Парораспределение

(Звездочкой отмечены второстепенные для данного элемента величины)

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ изме- рения, опре- деления
			1	2	3	
а. Измеряемые величины						
1	Ход сервомотора, мм ($\angle^\circ$)	$z^{см}(\phi)$				
2	Расход свежего пара, т/ч	D_1^*				
3	Подъем регулирующих клапанов, мм: I	$z_1^{кл}$				
4	Давление перед стопорным клапаном, ата	$p_1^{ст}$				
5	Давление после стопорного клапана, ата	$p_2^{ст}$				
6	Давление после регулирующих клапа- нов, ата: I	$p_2^{кл}$				
7	Температура пара перед стопорным кла- паном, $^\circ\text{C}$	$t_1^{ст}$				
б. Показатели экономичности						
	Падение давления в клапанах, ата: при полном открытии: I	$\Delta' p_1^{кл}$				
	в начале открытия очередного клапана: I	$\Delta'' p_1^{кл}$				

в. Условия испытания

- Упор парораспределения против повышения нагрузки.
- Отклонения основных параметров от номинальных значений:

$$\delta p_1 \leq \pm 0,5\%; \quad \delta t_1 \leq \pm 2\%.$$

- Число опытов и режим нагрузки определяются моментами начала открытия каждого из клапанов и максимального расхода пара на установку.

- Снятие характеристики перемещения клапанов $z^{кл} = f(z^{см}; \phi)$ на остановленной (или работающей) турбине.

г. Заключение

Б. Проточная часть

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ изме- рения, опре- деления деления
			1	2	3	
а. Измеряемые величины						
1	Ход сервомотора, мм ($\angle^\circ$)	$z^{см}(\varphi)$				
2	Расход свежего пара, т/ч	D_1^*				
3	Мощность генератора, кВт	N^*				
4	Давление перед стопорным клапаном, ата	$p_1^{ст}$				
5	Давление после стопорного клапана, ата	$p_2^{ст}$				
6	Давление в камерах отборов, ата: I	$p_1^{от}$				
7	Давление выхлопа, ата	p_2				
8	Температура пара перед стопорным кла- паном, $^\circ\text{C}$	$t_1^{ст}$				
9	Температура в камерах отборов, $^\circ\text{C}$ I	$t_1^{от}$				
10	Температура на выхлопе, $^\circ\text{C}$	t_2^*				
11	Расход конденсата, т/ч	G_K				
12	Расход пара на задние уплотнения, т/ч	$D_{упл}^*$				
13	Отсос пара из передних уплотнений вала, т/ч	$D_{упл}^*$				
14	Температура конденсата, $^\circ\text{C}$	t_K				
б. Показатели экономичности						
Внутренний относительный к. п. д. про- точной части, %						
до I отбора						
до выхлопа (диаграммный)						
турбины						
Потери на концевые уплотнения						

См.
пп.
12, 13

в. Условия испытания

- Упор парораспределения против повышения нагрузки.
- Отключение всех отборов пара.
- Надежная изоляция тепловой схемы от посторонних потоков пара и конденсата.
- Отклонение основных параметров от номинальных значений:

$$\delta p_1 \leq \pm 0,5\%; \quad \delta t_1 \leq 1\%; \quad \delta p_2 \leq \pm 2\%.$$

5. Опыт при максимальной нагрузке повторяется с полностью открытым парораспределением и сниженным, но постоянным давлением свежего пара

$$-\delta p_1 \leq \pm 0,5\%.$$

г. Заключение

Примечания:

1. При влажном паре на выходе необходимы точные измерения расхода свежего пара D_1 , конденсата G_k (для установки с конденсатором) и мощности N_3 ; кроме того, надо иметь данные о величине $\Delta N_{эм}$ или $\eta_{эм}$, и тогда для сквозного потока пара:

$$\eta_{вот} = \frac{860 (N_3 + \Delta N_{эм} - N^3) \cdot 100}{(D_1 - D^3) h_{из}} [\%];$$

о величинах N^3 и D^3 , связанных с исключением расхода пара на эжектор см. стр. 240.

2. Для измерения температуры пара в камерах отборов и определения к. п. д. отдельных отсеков проточной части должны быть установлены термомпары в проточной части; в противном случае эти измерения следует производить в трубопроводах отборов при испытании подогревателей — см. раздел В.

3. Измерение температуры конденсата (п. 14) позволяет определить удельный расход тепла q_1 (ккал/квт·ч) для установки с конденсатором.

В. Подогреватели

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ изме- рений, опре- деления
			1	2	3	
а. Измеряемые величины						
1	Ход сервомотора, мм ($\angle^\circ$)	$z^{см}$ (ф)				
2	Расход свежего пара, т/ч	D_1^*				
3	Мощность генератора, квт	N_3^*				
4	Давление пара в камерах отборов, ата: 1	p^{I0}				
5	Давление пара перед подогревателями, ата: № 1	p^I				
	(или падение давления в паропроводе)					
6	Расход конденсата через подогреватели, т/ч № 1	G_K^I				

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ измерения, определения, деления
			1	2	3	
7	Температура воды на входе в подогреватели, °C:					
	№ 1	$t_{к1}^I$				
8	Температура воды на выходе из подогревателей, °C (до и после обвода):					
	№ 1	$t_{к2}^I$				
9	Температура дренажа из подогревателей, °C:					
	№ 1	$t_{др}^I$				
б. Показатели экономичности						
1	Падение давления в паропроводе к подогревателю, ата:					
	№ 1	Δp^I				
2	Температурный напор в подогревателе, °C:					
	№ 1	δt^I				
3	Переохлаждение дренажа в подогревателе, °C:					
	№ 1	$\Delta t_{др}^I$				
4	Температура воды на выходе из подогревателя, °C:					
	№ 1	$t_{к2}^I$				

в. Условия испытания

1. Упор парораспределения против повышения нагрузки.
2. Нормальная тепловая схема установки и отклонения основных параметров от номинальных значений:

$$\delta p_1 \leq \pm 0,5\%; \quad \delta t_1 \leq \pm 2\%; \quad \delta p_2 \leq \pm 2\%.$$

$$3. G_{пит} = 1 \div 1,03 D_1.$$

4. Водяная плотность подогревателей и конденсатора, видимый уровень дренажа в подогревателях.

г. Заключение

Г. Конденсатор

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ измерения, определения
			1	2	3	
а. Измеряемые величины						
1	Ход сервомотора, мм ($\angle^\circ$)	$z^{cm}(\varphi)$				
2	Расход свежего пара, т/ч	D_1				
3	Мощность генератора, кВт	$N_э^*$				
4	Давление в горловине конденсатора, ата	p^K				
5	Давление на линии всасывания эжектора, ата	$p_в^э$				
6	Температура пара в выпускном патрубке, $^\circ\text{C}$	t_{21}^{an}				
7	Температура конденсата на выходе из конденсатора, $^\circ\text{C}$	t_K^K				
8	Температура охлаждающей воды, $^\circ\text{C}$: на входе » выходе	$t_{в1}$ $t_{в2}$				
9	Расход конденсата из конденсатора, т/ч	G_K^K				
10	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	W				
11	Расход воздуха у эжектора, кг/ч	$G_{возд}^э$				
12	Давление пара перед соплами эжектора, ата	$p_1^{э*}$				
13	Температура пара перед эжектором, $^\circ\text{C}$	$t_1^{э*}$				
14	Жесткость конденсата, мг-экв/л (присос сырой воды, %)	$ж$				
15	Содержание кислорода в конденсате, мг/л	O_2				
16	Паровая нагрузка конденсатора, кг/м ² ·ч	D^K/F_B^K				
17	Кратность охлаждения	m				
б. Показатели экономичности						
1	Паровое сопротивление конденсатора, ата	Δp^K				
2	Температурный напор, $^\circ\text{C}$	δt^K				
3	Переохлаждение конденсата, $^\circ\text{C}$	Δt_K^K				
4	Давление в конденсаторе	p^K				

в. Условия испытания

1. Упор парораспределения против повышения нагрузки.
2. $W = \text{const.}$
3. $t_{21} = \text{const.}$
4. Водяная плотность конденсатора.
5. Исключение добавки и других неучтенных потоков пара и воды в конденсатор и утечек до измерительной диафрагмы на конденсате.
6. Определение неустраиваемых потоков пара, воды в конденсатор.

г. Заключение

Примечание. Определение W и D^k — см. приложение 9-1.

Д. Установка в целом

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Номера опытов			Способ измерения, определения
			1	2	3	
а. Измеряемые величины						
1	Ход сервомотора, мм ($\angle^\circ$)	$z^{cm}(\varphi)$				
2	Расход свежего пара, т/ч	D_1				
3	Мощность генератора, кВт	N_{Σ}				
4	Давление пара перед стопорным клапаном, ата	$p_1^{ст}$				
5	Температура пара перед стопорным клапаном, $^\circ\text{C}$	$t_1^{ст}$				
6	Давление выхлопа, ата	p_2				
7	Температура питательной воды — конечная, $^\circ\text{C}$	$t_{пит}$				
8	Температура конденсата, поступающего в деаэратор, $^\circ\text{C}$	$t_{к1}^д$				
9	Температура конденсата перед подогревателями высокого давления — после питательного насоса, $^\circ\text{C}$	$t_{пит1}$				
10	Температура дренажа из ПВД в деаэратор, $^\circ\text{C}$	$t_{др1}^д$				
11	Температура пара на выхлопе, $^\circ\text{C}$	t_2				
12	Расход питательной воды, т/ч	$G_{пит}$				
13	Расход конденсата после подогревателей низкого давления, т/ч	G_k				
14	Давление питательной воды, ата	$p_{пит}$				
б. Показатели экономичности						
1	Удельный расход пара, кг/квт·ч	d_1				
2	Удельный расход тепла, ккал/квт·ч	q_1				

в. Условия испытания

- Упор парораспределения против повышения нагрузки.
- Нормальная тепловая схема установки и отклонение основных параметров от номинальных значений:

$$\delta p_1 \leq \pm 0,5\%; \quad \delta t_1 \leq \pm 5\%; \quad \delta p_2 \leq \pm 2\% \quad G_{\text{пит}} = (0,98 + 1,02) D_1; \\ \delta \cos \varphi \leq \pm 0,1; \quad \delta U \leq \pm 3\%.$$

- Водяная плотность подогревателей и конденсатора; видимый уровень дренажа в подогревателях; исключение добавки и утечек пара и конденсата в тепловой схеме установки, ее изоляция.

- Давление пара перед соплами эжектора — $1-1,1 p_n$.

- Отключение по пару деаэратора и регулируемых отборов.

- Минимальный уровень в конденсаторе.

г. Заключение

Примечание. Форма составлена применительно к принципиальной тепловой схеме рис. 5-2; в зависимости от тепловой схемы количество измерений для определения удельного расхода тепла может быть меньше или больше; расход дренажа из ПВД ($G_{\text{др}}$) можно определить приближенно:

$$G_{\text{др}} \approx G_{\text{пит}} (i_{\text{пит } 2} - i_{\text{пит } 1}) : 600.$$

Е. Приведение опытных величин расхода пара и тепла к условиям характеристики

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов		
					1	2	3
а. Расход пара, тепла и мощность в условиях опытов							
1	Расход свежего пара	D_1	т/ч	По приложениям 5-1 и 10-1, Д То же »			
2	Расход тепла	Q_1	Мккал/ч				
3	Мощность	N_3	Мвт				
б. Параметры в условиях опытов							
4	Давление свежего пара	p_1	ата	»			
5	Температура свежего пара	t_1	°С	»			
6	Давление выхлопа	p_2	ата	»			
7	Расход питательной воды	$G_{\text{пит}}$	т/ч	»			
8	Температура питательной воды	$t_{\text{пит}}$	°С	»			
9	К. п. д. генератора	η_r	—				

Продолжение

№ пп.	Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Формула, способ определения	Номера опытов		
					1	2	3
	в. Поправки на отклонение параметров от условий характеристики						
	Поправки к расходу тепла:						
10	на давление свежего пара	βQ_{p_1}	%	$\beta' Q_{p_1} (p_{1x} - p_1)$			
11	на температуру свежего пара . . .	βQ_{t_1}	%	$\beta' Q_{t_1} (t_{1x} - t_1)$			
12	на расход питательной воды	$\beta Q_{G_{\text{пит}}}$	%	$\beta' Q_{G_{\text{пит}}} \times (D_1 - G_{\text{пит}})$			
13	на температуру питательной воды . .	$\beta Q_{t_{\text{пит}}}$	%	$\beta' Q_{t_{\text{пит}}} \times (t_{\text{пит } x} - t_{\text{пит}})$			
14	Суммарная поправка	$\Sigma \beta Q$	%				
	Поправки к мощности:						
15	на давление выхлопа	ΔN_{p_2}	квт	$\Delta' N_{p_2} \times (p_{2x} - p_2)$			
16	на к. п. д. генератора	ΔN_{η}	»	$N_9 \left(\frac{\eta_{rx}}{\eta_r} - 1 \right)$			
17	Суммарная поправка к мощности	ΔN	»	$\Delta N_{p_2} + \Delta N_{\eta}$			
	г. Приведенные значения расхода пара, тепла и мощности						
18	Расход свежего пара	D_{1x}	т/ч	$Q_{1x} : (i_{1x} - i_{\text{пит } x})$			
19	Расход тепла	Q_{1x}	Мккал/ч	$Q_1 \left(1 + \frac{\Sigma \beta Q}{100} \right)$			
20	Мощность	$N_{\Sigma x}$	Мвт	$N_9 + \Delta N$			
21	Удельный расход тепла	q_{1x}	ккал/квт·ч	$Q_{1x} : N_{\Sigma x}$			

Примечания. 1. Параметры в условиях характеристики:

$$p_{1x} = \text{ата}; t_{1x} = ^\circ\text{C}; p_{2x} = \text{ата};$$

$t_{\text{пит}x}$ — по приложению 3-8; $\eta_{\text{ГХ}}$ — по приложению 5-3.

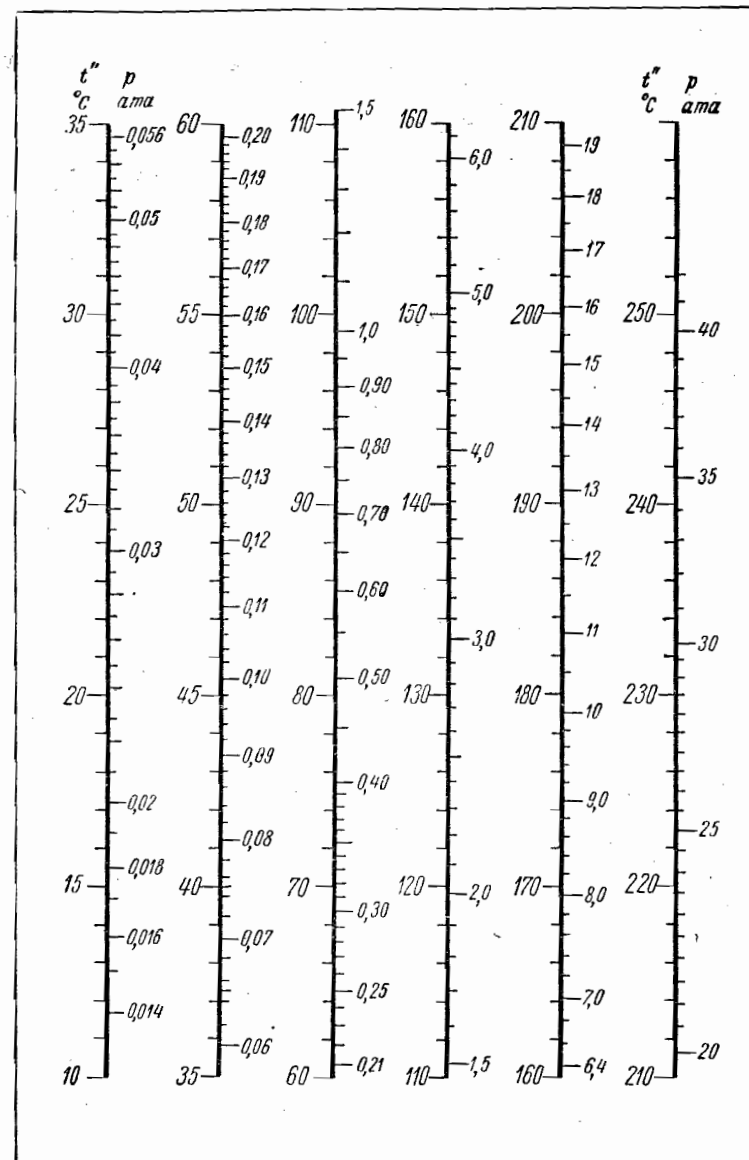
2. Поправки на отклонения параметров от условий характеристики:

$$\beta'Q_{p_1} = \text{--- проц/ата}; \beta'Q_{t_1} = \text{--- проц/град};$$

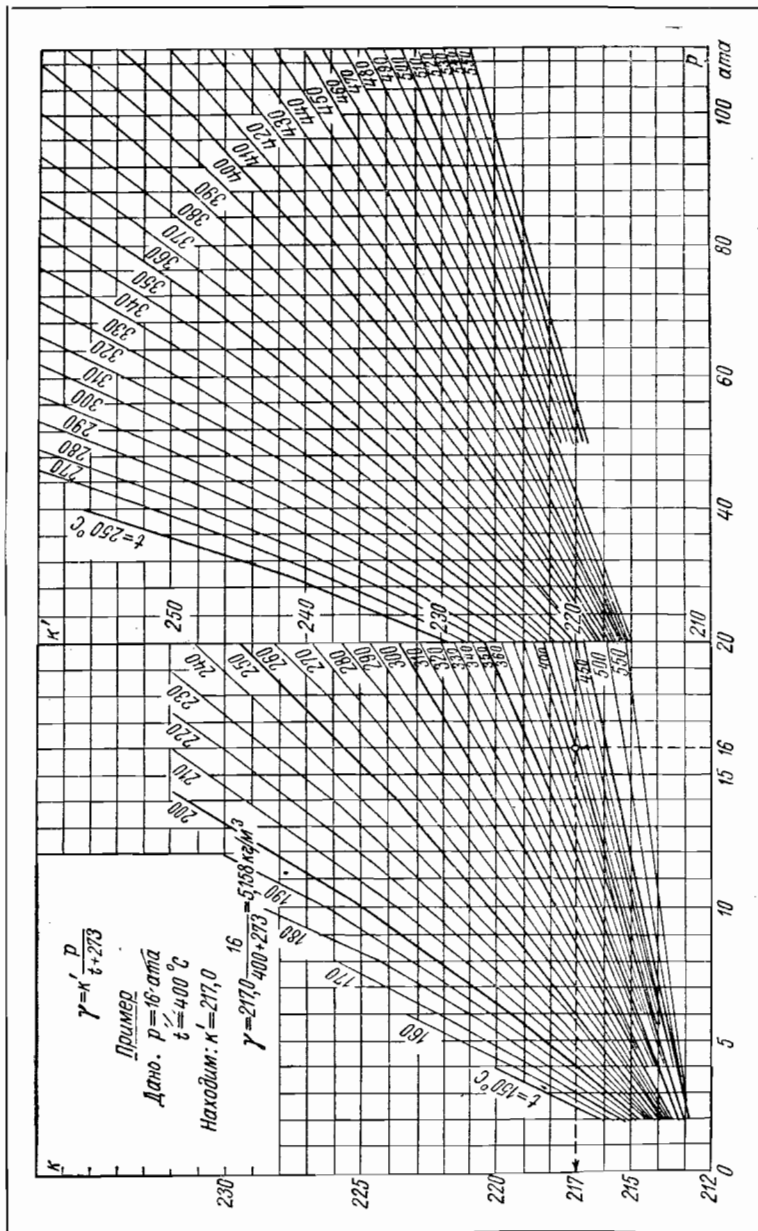
$$\beta'Q_{G_{\text{пит}}} = \text{--- проц/проц}; \beta'Q_{t_{\text{пит}}} = \text{--- проц/град}; \Delta'N_{p_2} = \text{--- кат/ата}; \text{ по --- (см. стр. 287).}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ I

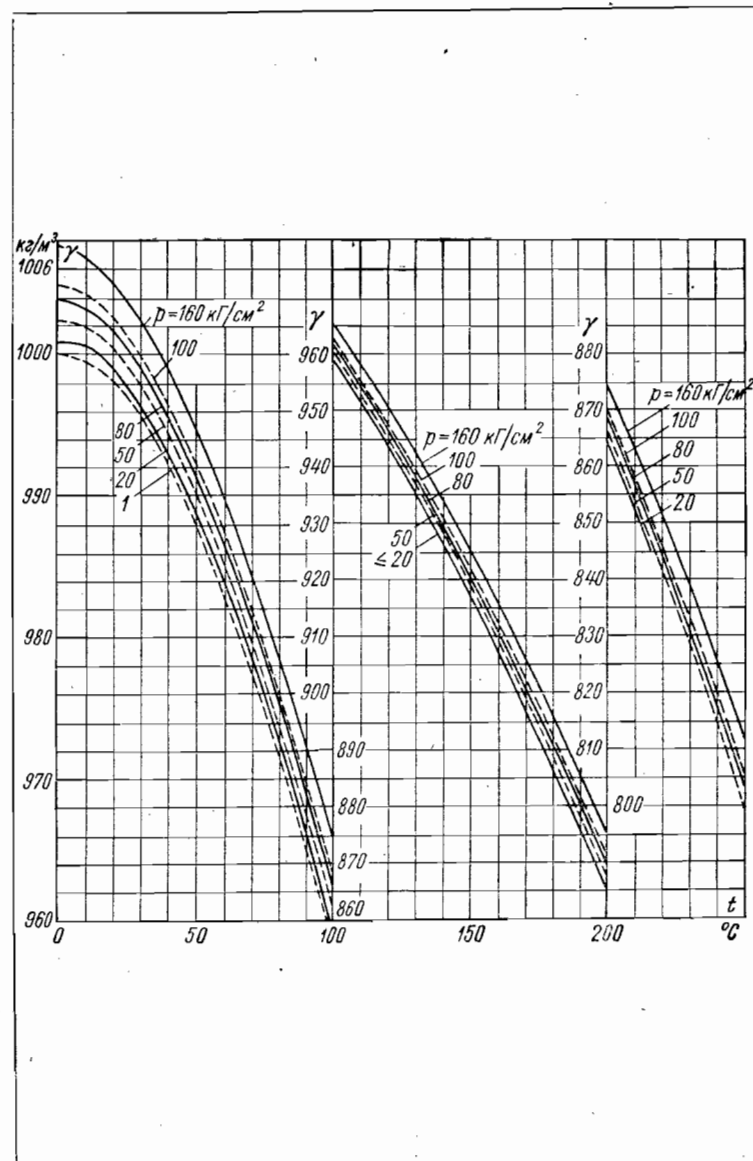
ТЕМПЕРАТУРА НАСЫЩЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

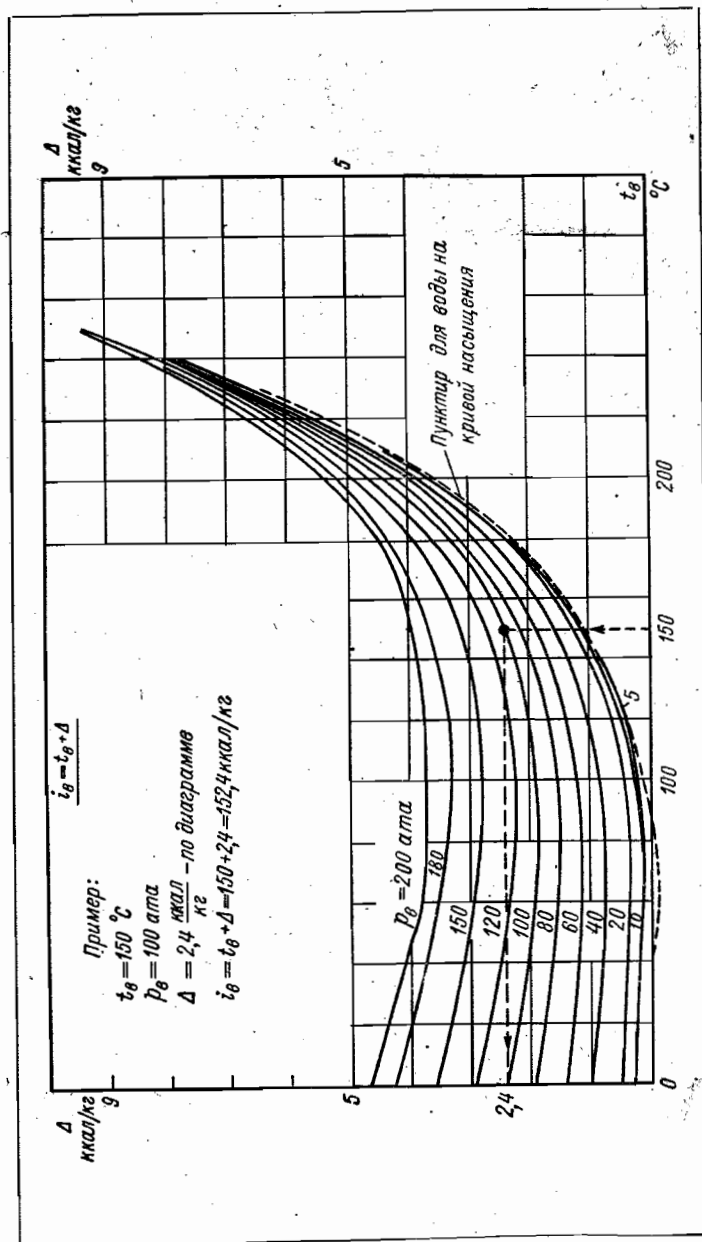


УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ВОДЯНОГО ПАРА



УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ВОДЫ





ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ТЕРМОПАРЫ
ПЛАТИНОРОДИЙ — ПЛАТИНА

при температуре свободных концов 0°C
(градуировка ПП)

Температура рабочего конца в $^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Т. э. д. с. в мв									
-20	-0,109									
-10	-0,055	-0,060	-0,066	-0,071	-0,077	-0,082	-0,087	-0,093	-0,098	-0,104
0	-0,000	-0,006	-0,011	-0,017	-0,022	-0,028	-0,033	-0,039	-0,044	-0,050
+ 0	0,000	0,006	0,011	0,017	0,022	0,028	0,034	0,040	0,045	0,051
10	0,057	0,063	0,069	0,074	0,080	0,086	0,092	0,098	0,103	0,109
20	0,115	0,121	0,127	0,133	0,139	0,145	0,151	0,157	0,164	0,170
30	0,176	0,182	0,188	0,194	0,200	0,206	0,212	0,218	0,225	0,231
40	0,237	0,243	0,250	0,256	0,263	0,269	0,275	0,282	0,288	0,294
50	0,301	0,307	0,314	0,320	0,327	0,333	0,340	0,346	0,353	0,359
60	0,366	0,373	0,379	0,386	0,392	0,399	0,406	0,412	0,419	0,425
70	0,432	0,439	0,446	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,486	0,493
80	0,500	0,507	0,514	0,520	0,527	0,534	0,541	0,548	0,555	0,562
90	0,569	0,576	0,583	0,590	0,597	0,604	0,611	0,618	0,626	0,633
100	0,640	0,647	0,654	0,662	0,669	0,676	0,683	0,690	0,698	0,705
110	0,712	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,756	0,764	0,771	0,779
120	0,786	0,794	0,801	0,809	0,816	0,824	0,831	0,839	0,846	0,854
130	0,861	0,869	0,876	0,884	0,891	0,899	0,907	0,914	0,922	0,929
140	0,937	0,945	0,952	0,960	0,968	0,976	0,983	0,991	0,999	1,006
150	1,014	1,022	1,030	1,038	1,046	1,054	1,061	1,069	1,077	1,085
160	1,093	1,101	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,157	1,165
170	1,173	1,181	1,189	1,197	1,205	1,213	1,222	1,230	1,238	1,246
180	1,254	1,262	1,271	1,279	1,287	1,295	1,304	1,312	1,320	1,329
190	1,337	1,345	1,354	1,362	1,370	1,379	1,382	1,395	1,404	1,412
200	1,421	1,430	1,438	1,448	1,456	1,464	1,472	1,482	1,492	1,500
210	1,508	1,518	1,526	1,534	1,542	1,552	1,562	1,570	1,579	1,587
220	1,596	1,605	1,614	1,622	1,631	1,640	1,649	1,658	1,666	1,675
230	1,684	1,693	1,702	1,710	1,719	1,728	1,737	1,746	1,755	1,763
240	1,772	1,781	1,790	1,799	1,808	1,817	1,825	1,834	1,843	1,852
250	1,861	1,870	1,879	1,888	1,897	1,906	1,914	1,923	1,932	1,941
260	1,950	1,959	1,968	1,977	1,986	1,995	2,004	2,013	2,022	2,031
270	2,040	2,049	2,058	2,067	2,076	2,085	2,094	2,103	2,112	2,121
280	2,130	2,139	2,148	2,157	2,166	2,175	2,184	2,193	2,202	2,212
290	2,220	2,229	2,238	2,247	2,256	2,265	2,275	2,284	2,293	2,302
300	2,311	2,320	2,329	2,338	2,347	2,357	2,366	2,375	2,384	2,393
310	2,402	2,411	2,420	2,430	2,439	2,448	2,457	2,466	2,476	2,485
320	2,494	2,503	2,512	2,522	2,531	2,540	2,549	2,558	2,568	2,578
330	2,586	2,594	2,604	2,614	2,623	2,632	2,641	2,650	2,660	2,669
340	2,678	2,687	2,697	2,706	2,716	2,725	2,735	2,744	2,754	2,763

Температура рабоче- го кон- ца в °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т. Э. Д. С. в мВ										
350	2,773	2,782	2,792	2,801	2,810	2,819	2,829	2,838	2,847	2,856
360	2,866	2,875	2,885	2,894	2,904	2,913	2,922	2,932	2,941	2,951
370	2,960	2,969	2,979	2,988	2,998	3,007	3,017	3,026	3,036	3,045
380	3,054	3,064	3,073	3,083	3,092	3,102	3,111	3,120	3,130	3,139
390	3,149	3,158	3,168	3,177	3,187	3,196	3,206	3,215	3,225	3,234
400	3,244	3,253	3,263	3,272	3,282	3,291	3,301	3,310	3,320	3,329
410	3,339	3,349	3,358	3,368	3,377	3,387	3,396	3,406	3,415	3,425
420	3,435	3,445	3,454	3,464	3,473	3,483	3,492	3,502	3,511	3,521
430	3,531	3,541	3,550	3,560	3,569	3,579	3,588	3,598	3,607	3,617
440	3,627	3,637	3,646	3,656	3,665	3,674	3,684	3,693	3,703	3,713
450	3,723	3,733	3,742	3,752	3,761	3,771	3,780	3,790	3,799	3,809
460	3,819	3,829	3,838	3,848	3,857	3,867	3,876	3,886	3,896	3,906
470	3,916	3,926	3,936	3,945	3,955	3,965	3,975	3,984	3,994	4,004
480	4,014	4,024	4,034	4,043	4,053	4,063	4,072	4,082	4,092	4,102
490	4,112	4,122	4,132	4,142	4,152	4,161	4,171	4,181	4,191	4,201
500	4,211	4,221	4,231	4,241	4,250	4,260	4,270	4,280	4,290	4,300
510	4,310	4,320	4,330	4,340	4,350	4,360	4,370	4,380	4,390	4,400
520	4,410	4,420	4,430	4,440	4,450	4,459	4,469	4,479	4,489	4,499
530	4,509	4,519	4,529	4,539	4,549	4,559	4,569	4,579	4,589	4,599
540	4,609	4,619	4,629	4,639	4,649	4,659	4,669	4,679	4,689	4,699
550	4,709	4,719	4,729	4,739	4,749	4,760	4,770	4,780	4,790	4,800
560	4,810	4,820	4,830	4,840	4,850	4,861	4,871	4,881	4,891	4,901
570	4,911	4,921	4,931	4,941	4,951	4,962	4,972	4,982	4,992	5,002
580	5,012	5,022	5,032	5,042	5,052	5,063	5,073	5,083	5,093	5,103
590	5,113	5,123	5,133	5,143	5,153	5,164	5,174	5,184	5,194	5,204
600	5,214	5,225	5,235	5,245	5,255	5,266	5,276	5,286	5,296	5,306
610	5,316	5,326	5,337	5,347	5,358	5,368	5,378	5,389	5,399	5,409
620	5,419	5,430	5,440	5,450	5,460	5,471	5,481	5,491	5,502	5,512
630	5,522	5,532	5,543	5,553	5,563	5,574	5,584	5,594	5,605	5,615
640	5,625	5,635	5,646	5,656	5,666	5,677	5,687	5,697	5,708	5,718
650	5,728	5,739	5,749	5,760	5,770	5,780	5,791	5,801	5,811	5,821
660	5,832	5,842	5,852	5,863	5,873	5,884	5,894	5,905	5,915	5,926
670	5,936	5,946	5,957	5,967	5,978	5,986	5,999	6,009	6,020	6,080
680	6,041	6,051	6,062	6,073	6,083	6,094	6,104	6,115	6,125	6,134
690	6,146	6,157	6,167	6,178	6,188	6,199	6,209	6,220	6,230	6,241
700	6,251	6,262	6,272	6,283	6,294	6,304	6,315	6,325	6,336	6,346
710	6,356	6,367	6,377	6,388	6,399	6,409	6,420	6,430	6,440	6,451
720	6,462	6,473	6,483	6,494	6,505	6,516	6,526	6,537	6,547	6,557
730	6,568	6,580	6,590	6,600	6,611	6,622	6,632	6,643	6,654	6,664
740	6,675	6,686	6,696	6,707	6,718	6,729	6,739	6,750	6,761	6,771
750	6,782	6,793	6,804	6,814	6,825	6,836	6,847	6,857	6,868	6,876
760	6,889	6,900	6,911	6,921	6,932	6,943	6,954	6,964	6,975	6,984
770	6,996	7,007	7,018	7,028	7,039	7,050	7,061	7,072	7,082	7,093
780	7,104	7,115	7,126	7,137	7,148	7,158	7,170	7,180	7,192	7,202
790	7,214	7,224	7,234	7,246	7,256	7,268	7,278	7,290	7,300	7,312

ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ТЕРМОПАРЫ
ХРОМЕЛЬ—АЛЮМЕЛЬпри температуре свободных концов 0° С
(градуировка ХА)

Температура рабоче- го кон- ца в °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т. Э. Д. С. в мВ										
-50	-1,86									
-40	-1,50									
-30	-1,14	-1,54								
-20	-0,77	-0,81	-1,57	-1,60	-1,64	-1,68	-1,72	-1,75	-1,79	-1,82
-10	-0,39	-0,43	-0,84	-0,88	-0,92	-0,96	-0,99	-1,03	-1,07	-1,10
-0	-0,00	-0,04	-0,47	-0,51	-0,55	-0,59	-0,62	-0,66	-0,70	-0,74
+0	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
60	2,43	2,47	2,51	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22
80	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06
100	4,10	4,14	4,18	4,22	4,26	4,31	4,35	4,39	4,43	4,47
110	4,51	4,55	4,59	4,63	4,67	4,72	4,76	4,80	4,84	4,88
120	4,92	4,96	5,00	5,04	5,08	5,13	5,17	5,21	5,25	5,29
130	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,61	5,65	5,69
140	5,73	5,77	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,01	6,05	6,09
150	6,13	6,17	6,21	6,25	6,29	6,33	6,37	6,41	6,45	6,49
160	6,53	6,57	6,61	6,65	6,69	6,73	6,77	6,81	6,85	6,89
170	6,93	6,97	7,01	7,05	7,09	7,13	7,17	7,21	7,25	7,29
180	7,33	7,37	7,41	7,45	7,49	7,53	7,57	7,61	7,65	7,69
190	7,73	7,77	7,81	7,85	7,89	7,93	7,97	8,01	8,05	8,09
200	8,13	8,17	8,21	8,25	8,29	8,33	8,37	8,41	8,45	8,49
210	8,53	8,57	8,61	8,65	8,69	8,73	8,77	8,81	8,85	8,89
220	8,93	8,97	9,01	9,06	9,09	9,14	9,18	9,22	9,26	9,30
230	9,34	9,38	9,42	9,46	9,50	9,54	9,58	9,62	9,66	9,70
240	9,74	9,78	9,82	9,86	9,90	9,95	9,99	10,03	10,07	10,11
250	10,15	10,19	10,23	10,27	10,31	10,35	10,40	10,44	10,48	10,52
260	10,56	10,60	10,64	10,68	10,72	10,77	10,81	10,85	10,89	10,93
270	10,97	11,01	11,05	11,09	11,13	11,18	11,22	11,26	11,30	11,34
280	11,38	11,42	11,46	11,51	11,55	11,59	11,63	11,67	11,72	11,76
290	11,80	11,84	11,88	11,92	11,96	12,01	12,05	12,09	12,13	12,17
300	12,21	12,25	12,29	12,33	12,37	12,42	12,46	12,50	12,54	12,58
310	12,62	12,66	12,70	12,75	12,79	12,83	12,87	12,91	12,96	13,00
320	13,04	13,08	13,12	13,16	13,20	13,25	13,29	13,33	13,37	13,41
330	13,45	13,49	13,53	13,58	13,62	13,66	13,70	13,74	13,79	13,83
340	13,87	13,91	13,95	14,00	14,04	14,08	14,12	14,16	14,21	14,25

Темпе- ратура рабо- че- го кон- ца в °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т. э. д. с. в мв										
350	14,30	14,34	14,38	14,43	14,47	14,51	14,55	14,59	14,64	14,68
360	14,72	14,76	14,80	14,85	14,89	14,93	14,97	15,01	15,06	15,10
370	15,14	15,18	15,22	15,27	15,31	15,35	15,39	15,43	15,48	15,52
380	15,56	15,60	15,64	15,69	15,73	15,77	15,81	15,85	15,90	15,94
390	15,99	16,02	16,06	16,11	16,15	16,19	16,23	16,27	16,32	16,36
400	16,40	16,44	16,49	16,53	16,57	16,63	16,66	16,70	16,74	16,79
410	16,83	16,87	16,91	16,96	17,00	17,04	17,08	17,12	17,17	17,21
420	17,25	17,29	17,33	17,38	17,42	17,46	17,50	17,54	17,59	17,63
430	17,67	17,71	17,75	17,79	17,84	17,88	17,92	17,96	18,01	18,05
440	18,09	18,13	18,17	18,22	18,26	18,30	18,34	18,38	18,43	18,47
450	18,51	18,55	18,60	18,64	18,68	18,73	18,77	18,81	18,85	18,90
460	18,94	18,98	19,03	19,07	19,11	19,16	19,20	19,24	19,28	19,33
470	19,37	19,41	19,45	19,50	19,54	19,58	19,62	19,66	19,71	19,75
480	19,79	19,83	19,88	19,92	19,96	20,01	20,05	20,09	20,13	20,18
490	20,22	20,26	20,31	20,35	20,39	20,44	20,48	20,52	20,56	20,61
500	20,65	20,69	20,74	20,78	20,82	20,87	20,91	20,95	20,99	21,04
510	21,08	21,12	21,16	21,21	21,25	21,29	21,33	21,37	21,42	21,46
520	21,50	21,54	21,59	21,63	21,67	21,72	21,76	21,80	21,84	21,89
530	21,93	21,97	22,01	22,06	22,10	22,14	22,18	22,22	22,27	22,31
540	22,35	22,39	22,44	22,48	22,52	22,57	22,61	22,65	22,69	22,74
550	22,78	22,82	22,87	22,91	22,95	23,00	23,04	23,08	23,12	23,17
560	23,21	23,25	23,29	23,34	23,38	23,42	23,46	23,50	23,55	23,59
570	23,63	23,67	23,72	23,76	23,80	23,85	23,89	23,93	23,97	24,02
580	24,06	24,10	24,15	24,19	24,23	24,28	24,32	24,36	24,40	24,45
590	24,49	24,53	24,57	24,62	24,66	24,70	24,74	24,78	24,83	24,87
600	24,91	24,95	25,00	25,04	25,08	25,13	25,16	25,20	25,24	25,28
610	25,33	25,38	25,42	25,47	25,51	25,55	25,59	25,63	25,68	25,72
620	25,76	25,80	25,85	25,89	25,93	25,98	26,02	26,06	26,10	26,15
630	26,19	26,23	26,27	26,32	26,36	26,40	26,44	26,48	26,53	26,57
640	26,61	26,65	26,70	26,74	26,78	26,83	26,87	26,91	26,95	27,00
650	27,04	27,08	27,12	27,17	27,21	27,25	27,29	27,33	27,38	27,42
660	27,46	27,50	27,54	27,58	27,63	27,67	27,71	27,75	27,80	27,84
670	27,88	27,92	27,96	28,01	28,05	28,09	28,13	28,17	28,22	28,26
680	28,30	28,34	28,39	28,43	28,47	28,52	28,56	28,60	28,64	28,69
690	28,73	28,77	28,81	28,86	28,90	28,94	28,98	29,02	29,07	29,11
700	29,15	29,19	29,23	29,28	29,32	29,36	29,40	29,44	29,49	29,53
710	29,57	29,61	29,65	29,70	29,74	29,78	29,82	29,86	29,91	29,95
720	29,99	30,03	30,07	30,12	30,16	30,20	30,24	30,28	30,33	30,37
730	30,41	30,45	30,49	30,54	30,58	30,62	30,66	30,70	30,75	30,79
740	30,83	30,87	30,91	30,95	30,99	31,04	31,08	31,12	31,16	31,20
750	31,24	31,27	31,32	31,37	31,41	31,45	31,49	31,53	31,58	31,62
760	31,66	31,70	31,74	31,79	31,83	31,87	31,91	31,95	32,00	32,04
770	32,08	32,12	32,16	32,20	32,24	32,29	32,33	32,37	32,41	32,45
780	32,49	32,53	32,57	32,62	32,66	32,70	32,74	32,78	32,83	32,87
790	32,90	32,94	32,98	33,03	33,07	33,12	33,16	33,20	33,24	33,28
800	33,32	33,36	33,40	33,44	33,48	33,52	33,56	33,60	33,64	33,68
810	33,72	33,76	33,80	33,84	33,88	33,93	33,97	34,01	34,05	34,09
820	34,13	34,17	34,21	34,25	34,29	34,34	34,38	34,42	34,46	34,50

ГРАДУИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ТЕРМОПАРЫ
ХРОМЕЛЬ — КОПЕЛЬпри температуре свободных концов 0°С
(градуировка ХК)

Темпе- ратура рабо- че- го кон- ца в °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т. э. д. с. в мв										
-50	-3,11									
-40	-2,50	-2,56	-2,62	-2,68	-2,74	-2,81	-2,87	-2,93	-2,99	-3,05
-30	-1,89	-1,95	-2,01	-2,07	-2,13	-2,20	-2,26	-2,32	-2,38	-2,44
-20	-1,27	-1,33	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
0	-0,00	-0,06	-0,13	-0,19	-0,26	-0,32	-0,38	-0,45	-0,51	-0,58
+ 0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,34	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
210	15,48	15,56	15,64	15,72	15,80	15,89	15,97	16,05	16,13	16,21
220	16,30	16,38	16,46	16,54	16,62	16,71	16,79	16,86	16,95	17,03
230	17,12	17,20	17,28	17,37	17,45	17,53	17,62	17,70	17,78	17,87
240	17,95	18,03	18,11	18,19	18,28	18,36	18,44	18,52	18,61	18,70
250	18,77	18,85	18,93	19,02	19,10	19,18	19,27	19,35	19,43	19,52
260	19,60	19,68	19,76	19,85	19,93	20,01	20,10	20,18	20,26	20,35
270	20,43	20,51	20,59	20,67	20,75	20,84	20,92	21,00	21,08	21,16
280	21,25	21,33	21,41	21,50	21,58	21,66	21,74	21,83	21,91	21,99
290	22,08	22,16	22,24	22,33	22,41	22,49	22,58	22,66	22,74	22,82
300	22,91	22,99	23,08	23,16	23,24	23,33	23,41	23,50	23,58	23,67
310	23,75	23,84	23,92	24,01	24,09	24,18	24,26	24,35	24,43	24,52
320	24,60	24,69	24,77	24,86	24,94	25,03	25,11	25,20	25,28	25,37
330	25,45	25,54	25,62	25,71	25,79	25,87	25,96	26,04	26,13	26,22

Темпе- ратура рабо- че- го кон- ца в °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т. э. д. с. в мв										
340	26,31	26,39	26,48	26,56	26,65	26,74	26,82	26,91	26,99	27,08
350	27,16	27,25	27,33	27,42	27,50	27,59	27,67	27,76	27,84	27,93
360	28,02	28,11	28,20	28,28	28,37	28,46	28,55	28,63	28,72	28,81
370	28,89	28,98	29,07	29,15	29,24	29,33	29,41	29,50	29,59	29,67
380	29,76	29,84	29,93	30,01	30,10	30,18	30,27	30,35	30,44	30,53
390	30,61	30,71	30,80	30,88	30,97	31,06	31,14	31,23	31,31	31,40
400	31,49	31,58	31,67	31,75	31,84	31,93	32,01	32,10	32,19	32,27
410	32,35	32,44	32,53	32,61	32,70	32,79	32,87	32,96	33,05	33,14
420	33,22	33,31	33,40	33,48	33,57	33,66	33,74	33,83	33,91	34,00
430	34,08	34,17	34,26	34,34	34,43	34,52	34,61	34,69	34,78	34,86
440	34,95	35,04	35,13	35,21	35,30	35,39	35,47	35,56	35,65	35,73
450	35,82	35,91	35,99	36,08	36,16	36,25	36,34	36,42	36,51	36,59
460	36,68	36,77	36,85	36,94	37,03	37,12	37,20	37,29	37,38	37,46
470	37,55	37,64	37,72	37,81	37,90	37,99	38,07	38,16	38,25	38,33
480	38,42	38,51	38,59	38,68	38,77	38,86	38,94	39,03	39,12	39,20
490	39,29	39,38	39,46	39,55	39,64	39,73	39,81	39,90	39,99	40,07
500	40,16	40,25	40,33	40,41	40,51	40,60	40,68	40,77	40,86	40,94
510	41,03	41,12	41,21	41,29	41,38	41,47	41,56	41,65	41,73	41,86
520	41,91	42,00	42,10	42,17	42,26	42,35	42,44	42,53	42,61	42,70
530	42,79	42,88	42,98	43,06	43,14	43,24	43,32	43,42	43,50	43,58
540	43,68	43,76	43,85	43,94	44,02	44,12	44,20	44,30	44,38	44,46
550	44,56	44,64	44,74	44,82	44,92	45,00	45,09	45,18	45,27	45,36
560	45,45	45,54	45,63	45,72	45,81	45,90	45,98	46,07	46,16	46,25
570	46,34	46,43	46,52	46,61	46,70	46,79	46,87	46,96	47,05	47,14
580	47,23	47,32	47,41	47,50	47,59	47,68	47,76	47,85	47,94	48,03
590	48,12	48,21	48,30	48,39	48,48	48,57	48,66	48,75	48,84	48,92
600	49,02	49,11	49,19	49,28	49,37	49,46	49,55	49,64	49,72	49,81
610	49,90	49,99	50,08	50,16	50,25	50,34	50,43	50,52	50,60	50,69
620	50,78	50,87	50,96	51,04	51,13	51,23	51,31	51,40	51,48	51,57
630	51,66	51,75	51,83	51,92	52,01	52,10	52,18	52,27	52,36	52,44
640	52,53	52,62	52,71	52,79	52,88	52,97	53,06	53,15	53,23	53,32
650	53,41	53,50	53,58	53,67	53,76	53,85	53,93	54,02	54,11	54,19
660	54,28	54,37	54,45	54,54	54,63	54,72	54,80	54,89	54,98	55,06
670	55,15	55,24	55,32	55,41	55,50	55,59	55,67	55,76	55,85	55,94
680	56,03	56,12	56,20	56,29	56,38	56,47	56,55	56,64	56,73	56,81
690	56,90	56,99	57,07	57,16	57,25	57,34	57,42	57,51	57,60	57,68
700	57,77	57,86	57,94	58,03	58,12	58,21	58,29	58,38	58,47	58,55
710	58,64	58,73	58,81	58,90	58,99	59,08	59,16	59,25	59,34	59,42
720	59,51	59,60	59,68	59,77	59,85	59,94	60,03	60,11	60,20	60,28
730	60,37	60,46	60,54	60,63	60,72	60,81	60,89	60,98	61,07	61,15
740	61,24	61,33	61,41	61,50	61,59	61,68	61,76	61,85	61,94	62,02
750	62,11	62,20	62,28	62,37	62,40	62,54	62,63	62,71	62,80	62,88
760	62,97	63,06	63,14	63,23	63,31	63,40	63,49	63,57	63,66	63,74
770	63,83	63,92	64,00	64,09	64,18	64,27	64,37	64,44	64,53	64,61
780	64,70	64,79	64,87	64,96	65,04	65,13	65,22	65,30	65,39	65,47
790	65,56	65,65	65,73	65,82	65,90	65,99	66,08	66,16	66,25	66,33
800	66,42									

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрос В. Р., Контрольно-измерительные приборы, Гос-
топтехиздат, 1958.
2. Байбаков О. В. и Зеегофер О. И., Гидравлика
и насосы, Госэнергоиздат, 1957.
3. Беликович Я. С., Приближенные вычисления, Гостех-
издат, 1949.
4. Берман Л. Д. и Зингер Н. М., Руководящие указа-
ния по наладке и эксплуатации пароструйных эжекторов конденса-
ционных установок, МЭС, Госэнергоиздат, 1956.
5. Блюдов В. П., Конденсационные устройства паровых
турбин, Госэнергоиздат, 1951.
6. Горнштейн В. М., Наивыгоднейшее распределение на-
грузки между параллельно работающими электростанциями, Гос-
энергоиздат, 1949.
7. Гребень М. А. и Шетинин А. А., Регулирование
паровых турбин Ленинградского Металлического завода, Конструк-
ция, испытание и наладка, Госэнергоиздат, 1959.
8. Жохровский М. К., Техника измерения давления и раз-
режения, 1952.
9. Зильберман А. С., «Обобщенные» поправки на вакуум
паровых турбин, «Советское котлостроение», 1945, № 2.
10. Зильберман А. С., Локтионов Н. В., Диаграммы
режимов турбин с двумя регулируемыми отборами пара, «Советское
котлотурбостроение», 1937, № 5.
11. Зильберман А. С. и Смоляров Г. С., Влияние
вакуума в конденсаторе на экономичность паровой турбины, «Тепло-
силовое хозяйство», 1939, № 7.
12. i — диаграмма для водяного пара по таблицам ВТИ. Масштаб:
 $1 \text{ ккал/кг} = 5 \text{ мм}$; $0,01 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град} = 25 \text{ мм}$, Госэнергоиздат, 1958.
13. Кириллов И. И., Кантор С. А., Теория и кон-
струкция паровых турбин, Машгиз, 1947.
14. Краткий справочник физико-химических величин, под ред.
Мищенко К. П. и Равделя А. А., изд. 3-е, перераб., Госхимиздат, 1959.
15. Литвин А. М., Теоретические основы теплотехники, тех-
ническая термодинамика и теория теплопередачи, изд. 4-е, Госэнерго-
издат, 1960.
16. Лосев С. М., Паровые турбины и конденсационные устрой-
ства. Теория, конструкция и эксплуатация, изд. 8-е, перераб., Гос-
энергоиздат, 1954.
17. Мелентьев Л. А., Основные вопросы промышленной
теплоэнергетики, Госэнергоиздат, 1954.
18. Правила 27-54 по применению и поверке расходомеров с нор-
мальными диафрагмами, соплами и трубами Вентури, 1955.

19. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей, МЭС, Госэнергоиздат, 1953.
20. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1953.
21. Проверка и настройка систем регулирования конденсационных паровых турбин, ОРГРЭС, составили Веллер В. Н. и Шувалов Г. И., Госэнергоиздат, 1945.
22. Рошаль М. И., Прецизионный замер скоростей вращения при установившихся и переходных процессах с помощью электронных преобразователей частоты, сб. ЛМЗ № 6, Исследования элементов паровых и газовых турбин и осевых компрессоров, под ред. Зильбермана А. С., Машгиз, 1960.
23. Самойлович Г. С. и Трояновский Б. М., Переменный режим работы паровых турбин, Госэнергоиздат, 1955.
24. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, ВТИ, Госэнергоиздат, 1958.
25. Теплотехнический справочник, Госэнергоиздат, т. 1, 1957; т. 2, 1958.
26. Тубянский Л. И., Обслуживание паровых турбин нормального давления ЛМЗ, Госэнергоиздат, 1949.
27. Тубянский Л. И., Френкель Л. Д., Паровые турбины высокого давления Ленинградского Металлического завода. Конструкция и обслуживание, изд. 2-е, исправленное и дополненное, Госэнергоиздат, 1956.
28. Тубянский Л. И., Испытания органов парораспределения паровых турбин, сб. ЛМЗ № 6, Исследования элементов паровых и газовых турбин и осевых компрессоров, под ред. Зильбермана А. С., Машгиз, 1960.
29. Ухоботин М. А., Испытание паровых турбогенераторов, ОРГРЭС, Госэнергоиздат, 1952.
30. Щегляев А. В., Паровые турбины, Госэнергоиздат, 1955.
31. Щегляев А. В., Морозов Н. Г., Испытание паровых турбин, Госэнергоиздат, 1937.
32. Щегляев А. В., Регулирование паровых турбин, ОНТИ, 1938.
33. Яковлев К. П., Математическая обработка результатов измерений, Гостехиздат, 1950.